UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Determinação de perdas e rendimento em motores elétricos empregando termografia infravermelha

Roberto Akira Yamachita

Itajubá, dezembro de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Roberto Akira Yamachita

Determinação de perdas e rendimento em motores elétricos empregando termografia infravermelha

Tese submetida ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistema Elétrico de Potência

Orientador: Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

Dezembro de 2013

Itajubá

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

Y11d

Yamachita, Roberto Akira
Determinação de perdas e rendimento em motores elétricos empregando termografia infravermelha / Roberto Akira Yamachita. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013.
158 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Motor de indução. 2. Termografia. 3. Eficiência. 4. Separa_ção de perdas. I. Bortoni, Edson da Costa, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Roberto Akira Yamachita

Determinação das perdas e rendimento em motores elétricos empregando termografia infravermelha

Tese aprovada por banca examinadora em 27 de novembro de 2013, conferindo ao autor o título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni (Unifei) (Orientador)

Prof. Dr. Ronaldo Rossi (Unesp)

Prof. Dr. Luiz Octavio Mattos dos Reis (Unitau)

Prof. Dr. Jamil Haddad (Unifei)

Prof. Dr. Cláudio Ferreira (Unifei)

Itajubá

2013

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Inez, ao meu filho Vinícius e a minha filha Júlia (in memoriam), pela persistência e coragem que vocês me passaram para enfrentar os grandes desafios deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus por esta conquista.

A minha esposa Inez, meu filho Vinícius e minha filha Júlia (in memoriam) pelo apoio e compreensão quanto às ausências tão necessárias para a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais pelo carinho e dedicação ao longo dos anos que foram importantes para a minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni, pela amizade, paciência e atenção em suprir minhas lacunas de conhecimento e experiência, na análise e na sugestão do texto da tese.

Ao Prof. Dr. Jamil Haddad pela amizade, apoio e incentivo para o desenvolvimento da tese.

Ao Prof. José Carlos Grilo Rodrigues pela autorização para realização de ensaios no LEPCH - Laboratório Eletromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas que contou com a colaboração dos técnicos Luiz Sérgio Ferreira, Luciano Mesquita Teles e Luiz Octávio Medeiros para montagem dos motores na bancada e realização dos ensaios.

Aos alunos de graduação João Marcondes Guimarães e Mateus Cândido Santos que ajudaram na realização dos ensaios dos motores na bancada e captura das imagens termográficas.

Aos professores, amigos e colegas do EXCEN – Centro de Excelência em Eficiência Energética pelo convívio e incentivo para a realização deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Unifei, as secretárias do Programa de Pós-Graduação e do Departamento de Registro Acadêmico.

Ao PROCEL/Eletrobras que contribuiu na implementação do EXCEN com uma infraestrutura para a realização de estudos e pesquisas.

Aos membros da banca examinadora pelas contribuições no exame de qualificação e pela participação no exame de defesa da tese.

A TODOS, A MINHA ETERNA GRATIDÃO.

RESUMO

O presente trabalho busca obter as perdas e o rendimento do motor elétrico pelo método termográfico, o qual parte do princípio de que as perdas em um motor elétrico se dissipam na forma de calor, e o compara com um método tradicional de separação de perdas com medição direta da potência elétrica e mecânica. Ambos os métodos são introduzidos detalhadamente, mostrando todos os passos para obtenção das perdas e do rendimento e os equipamentos utilizados. O consumo energético brasileiro vem crescendo muito ao longo dos anos e isso se deve principalmente ao crescimento populacional, ao desenvolvimento tecnológico e à dependência cada vez maior do ser humano por energia elétrica. Outro motivo que causa um crescimento desse consumo é o desperdício, o uso inadequado dos equipamentos e a utilização de equipamentos ineficientes. Um dos grandes problemas que pode ser encontrado é que, buscando uma confiabilidade alta, pessoas responsáveis pela manutenção instalam o motor superdimensionado. Logo é desejável realizar uma análise dos motores para verificar se estão sendo utilizados de acordo com a carga que está acoplada no eixo. Outro ponto de desperdício que pode ser observado é que os motores deterioram ao longo do tempo de operação, assim é necessário analisar a troca. Para determinar se é realmente viável a troca é preciso determinar as perdas e o rendimento do motor. Essa tarefa não é simples visto que na maioria dos casos essa avaliação só pode ser realizada com a parada da linha de produção que muitas vezes não é possível fazer devido à política da empresa.

Palavras-Chave: Motor elétrico, termografia, eficiência, separação de perdas.

ABSTRACT

In this concern this thesis aims to determine the losses and efficiency of the electric motor by means of thermography assuming the losses in an electric motor is dissipated as heat. The results were compared with the traditional method which adopts separation of losses measured directly by means of electric and mechanic power. Both methods are detailed showing all equipment and steps used for obtaining of losses and efficiency. In Brazil the energy consumption has been increasing expressively over the years caused mainly due to population growth, technological development and dependence of human beings for electricity. Other reasons for this increasing are the energy wasteful, the improper use of equipment and use of inefficient equipment. Regarding the problems associated with the size of electric motor, sometimes the designer supersize the motor for guarantee the reliability range required. Then, it is desirable to carry out an analysis to certify that motors are used in accordance with the load coupled to their shaft. Another energy wasteful can be observed during the deterioration of motors along time of operation becoming indispensible to analyze the need for their substitution. In most of cases it is not a trivial task once this analysis require the completed stop of production process which in turn depends on company policy.

Key words: electric motor; thermography; efficiency; separation of losses.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CFD - *Computational Fluid Dynamics*

CSA – *Canadian Standards Association*

EXCEN - Centro de Excelência em Eficiência Energética

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

JEC - *Japanese Electrotechinical Committee*

LEPCH - Laboratório Eletro-Mecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

SLLs – *Stray Load Losses*

Unifei - Universidade Federal de Itajubá

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

O consumo energético brasileiro vem crescendo muito ao longo dos anos e isso se deve principalmente ao crescimento populacional, ao desenvolvimento tecnológico e à dependência cada vez maior do ser humano por energia. Porém há outro motivo que causa um crescimento desse consumo é o desperdício, o uso inadequado dos equipamentos e a utilização de equipamentos ineficientes.

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) busca promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica; eliminando os desperdícios e reduzindo os custos e os investimentos setoriais; para isso, apoia a criação de centros de pesquisa, como por exemplo, o Centro de Excelência em Eficiência Energética (EXCEN) da Universidade Federal de Itajubá (Unifei) que tem como objetivo promover o uso eficiente da energia, reduzindo as perdas energéticas nas diversas atividades sócio-econômicas, e assim, contribuir para um futuro mais sustentável.

A indústria, segundo Narrol e Stiver (2008), consome boa parte da energia elétrica mundial e os motores elétricos são responsáveis por cerca de 75% desse consumo. Outra informação importante é que os motores elétricos são responsáveis por cerca de 25% do consumo de energia elétrica no Brasil (BORTONI, 2006). Sendo assim, a implementação de estudos sobre eficiência energética podem evitar ou postergar o investimento em fontes de geração de energia.

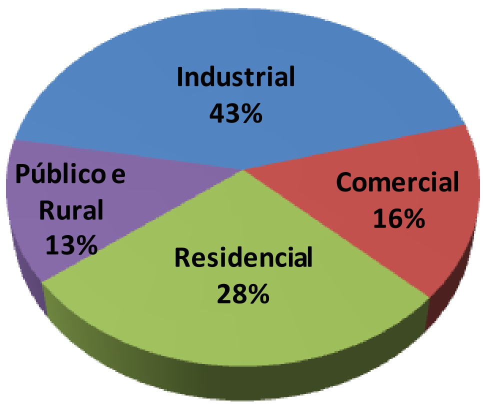


Figura 1.1 – Utilização da energia elétrica no Brasil

Fonte: Bortoni (2006)

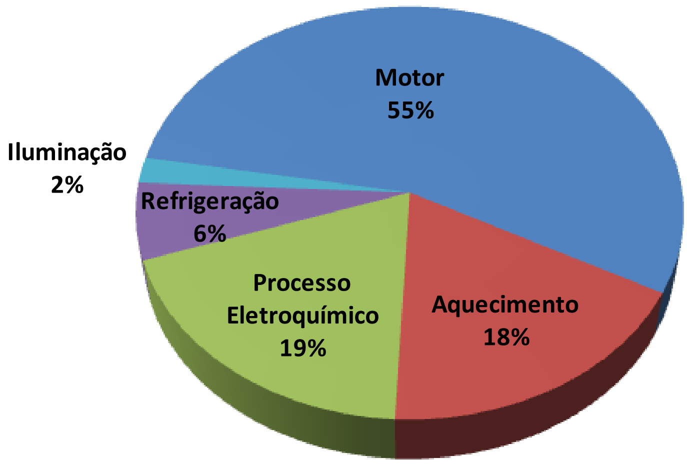


Figura 1.2 – Utilização da energia elétrica na indústria

Fonte: Bortoni (2006)

Através das figuras 1.1 e 1.2 apresentadas percebe-se que reduzir as perdas no motor pode representar um ganho importante para a economia energética. Um dos grandes problemas que pode ser encontrado é que, buscando uma confiabilidade alta, muitos responsáveis pela manutenção superdimensionam o motor, isto é, utilizam motores com uma capacidade de trabalho superior à carga que é colocada em seu eixo. Logo é desejável realizar uma análise dos motores para verificar se estão sendo utilizados de acordo com a carga que está acoplada no eixo.

Outro ponto de desperdício que pode ser observado é que os motores deterioram ao longo do tempo de operação, assim um retrofit ou uma troca de equipamentos nas instalações industriais é necessário. Para determinar se a troca é realmente viável é preciso determinar o rendimento do motor. Essa tarefa não é simples visto que na maioria dos casos essa avaliação só pode ser realizada com a parada da linha de produção que muitas vezes não é possível fazer devido à política da empresa.

As principais perdas em um motor de indução acontecem devido às perdas Joule no estator, perdas Joule no rotor, perdas Joule no ferro, perdas por dispersão e perdas por ventilação e atrito. A seguir é apresentada a Figura 1.3 com os principais componetes de um motor de indução.

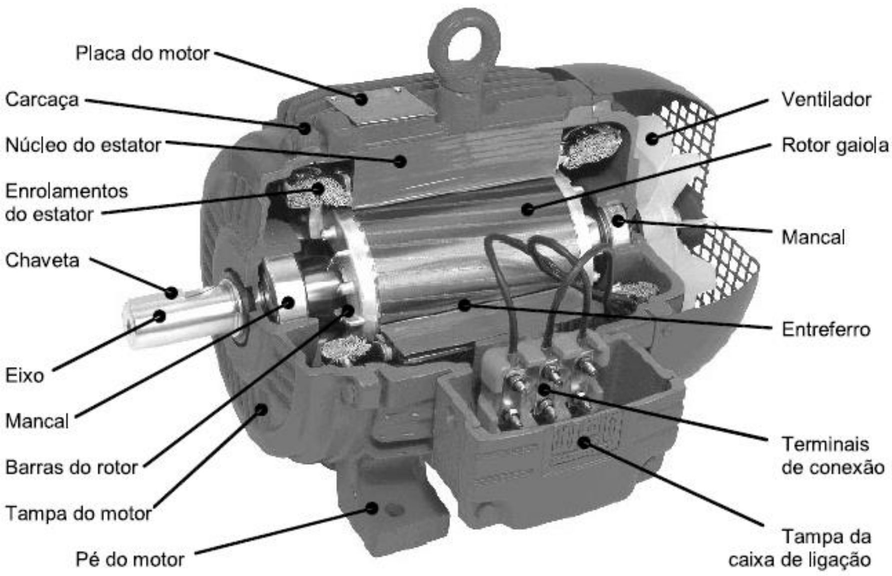


Figura 1.3 – Aspecto construtivo de motores de indução trifásicos

Fonte: Bortoni (2006)

Os motores de alto rendimento se apresentam como uma alternativa para a economia de energia em sistemas motrizes, muito embora não sejam as soluções definitivas para todos os problemas energéticos relacionados aos motores de indução, pois a operação depende de alguns fatores como: condições do alimentador, método de partida, ambiente de trabalho, etc.

A principal característica destes motores é a melhoria em pontos vitais onde se concentram a maioria das perdas. Como exemplo, pode-se citar o aumento da quantidade de cobre nos enrolamentos do estator, incluindo o projeto otimizado das ranhuras, e, o superdimensionamento das barras do rotor para diminuir as perdas por efeito Joule; diminuição da intensidade de campo magnético e utilização de chapas magnéticas de boa qualidade para reduzir as perdas no ferro e a corrente de magnetização; emprego de rolamentos adequados e otimização do projeto dos ventiladores para diminuir as perdas por atrito e ventilação; e, finalmente, regularidade do entre-ferro, melhoria no isolamento e tratamento térmico das chapas do estator e do rotor para reduzir as perdas por dispersão. Estas medidas podem acarretar uma redução de até 30% das perdas, o que significa uma real economia de energia (BORTONI, 2006).

Um grande potencial de aplicação de motores de alto rendimento pode ser encontrado no acionamento de pequenas máquinas, muitas vezes colocadas à margem em estudos de conservação energética, já que é comum imaginar que motores com potência inferior a 10 cv são pequenos demais para viabilizar a sua substituição. Porém, deve-se ter sempre em mente que estes motores contam com uma fatia de aproximadamente 85% dos motores instalados, contribuindo com cerca de 25% de todo o consumo industrial, e que a melhoria de rendimento em um motor de pequeno porte pode ser de 4 a 6 pontos percentuais, enquanto que este ganho para grandes motores é da ordem de apenas 2 pontos percentuais (BORTONI, 2006).

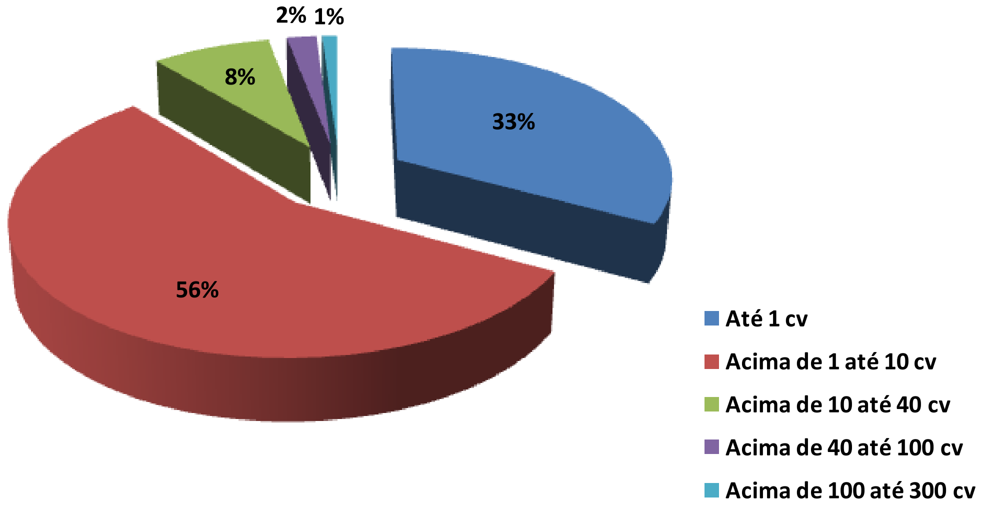


Figura 1.4 – Distribuição de motores vendidos nos últimos 20 anos por faixa de potência
Fonte: Bortoni (2006)

Para a obtenção do rendimento dos motores de indução é necessário medir as perdas existentes, e as principais normas internacionais existentes para o ensaio de rendimento dos motores de indução trifásicos são a IEEE std 112, IEC 34-2 e a JEC std 37.

Uma alternativa para calcular as perdas por aquecimento no motor é a termografia infravermelha, pois permite a leitura das temperaturas sem a necessidade de contato com as partes energizadas e componentes girantes, garantindo a segurança do pessoal envolvido com as medições. Outra vantagem está na possibilidade de realizar as medições com o motor ligado à rede de energia elétrica, pois na maioria das vezes, as indústrias estão com as linhas

de produção operando no limite, e as solicitações de intervenções para a realização de manutenções preventivas tornam uma difícil tarefa de ser realizada.

Além da possibilidade de analisar o rendimento da máquina através da termografia infravermelha, outro fator importante é a verificação dos pontos quentes que permite analisar as condições dos equipamentos. Logo, uma simples inspeção contribuirá para a definição do momento adequado de parada da unidade para a realização da manutenção preventiva.

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um método expedito para estimar as perdas e o rendimento de motores de indução trifásicos, tendo como base princípios de calorimetria, utilização das técnicas de termografia infravermelha e a medição de vazão dos fluídos refrigerantes por métodos não intrusivos. Ao invés da instalação de medidores de temperatura por contato nas entradas e saídas dos trocadores de calor e nas superfícies radiantes, foram realizadas medidas de temperatura à distância. Sendo assim, este trabalho estima as perdas e o rendimento de motores pelo método calorimétrico e compara com o rendimento calculado através de medições diretas.

1.3. Organização do trabalho

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os motores de indução trifásica abordando os tipos de perdas e as principais metodologias utilizadas na determinação de rendimento de motores de indução de acordo com as normas IEEE- STD-112 e IEC – 34-2.

Em seguida, foi desenvolvido o capítulo 3 abordando processo de elevação de temperatura em motores de indução, os princípios de transferência de calor e características de medição e detecção de radiação.

Ainda dentro do referencial teórico, o capítulo 4 traz uma abordagem sobre o método calorimétrico em motores de indução, onde são apresentadas as principais etapas da metodologia de medição, e também, as técnicas de medição de temperatura utilizando a termografia infravermelha e o processamento de imagens termográficas.

No capítulo 5 é apresentado um estudo sobre análise de erros levando em consideração procedimentos estatísticos e sistemáticos, incertezas, graus de liberdade e propagação de erros.

O estudo de caso, apresentado no capítulo 6, mostra a bancada onde foram realizados os ensaios dos motores de indução, de acordo com a metodologia apresentada neste trabalho, e também, o processamento das imagens termográficas para comparação dos resultados com o método de separação de perdas.

Finalmente, no capítulo 7, são analisados os resultados e apresentadas as conclusões e recomendações deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A bibliografia consultada está relacionada com os métodos para obtenção das perdas em motores de indução trifásicos que estão correlacionadas com a proposta de metodologia para a determinação das perdas e o rendimento de motores empregando a termografia infravermelha.

Sendo assim, na sequência é apresentada uma síntese dos textos consultados nesta revisão bibliográfica abordando os aspectos e as conclusões que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Bortoni e outros (2007), avaliaram as atividades de manutenção preventiva e corretiva de motores. Verificou-se que a realização de ações simples como a limpeza e lubrificação resultaram numa melhora no rendimento dos motores analisados.

Boglietti, A. e outros (2004) analisaram o cálculo das perdas por dispersão utilizando três métodos (IEEE 112-B, IEC 34-2 e a JEC 37). Observou-se que a norma IEEE apresentou os melhores resultados; a norma IEC apresentou uma discrepância nos valores, principalmente para os motores de até 90 kW, pois adota um valor de perdas por dispersão iguais a 0,5% da potência; e a norma JEC despreza as perdas por dispersão.

Almeida e outros (2002) analisaram o efeito das perdas por dispersão no cálculo do rendimento dos motores pelos métodos da IEEE 112-B e IEC 34-2. Verificaram que na IEC 34-2, as perdas por dispersão, conhecidas também com SLLs (*Stray load losses*), não são calculadas, mas são estimadas arbitrariamente como sendo 0,5% da potência de entrada em plena carga. Já na norma IEEE 112-B, as SLLs são as perdas restantes das outras três perdas (perdas Joule, as perdas no núcleo e as perdas por atrito e ventilação) após a medição das perdas totais, medida pelo método direto (medição da potência de saída mecânica, com um dinamômetro e medição da potência elétrica de entrada). Assim, concluíram que, quando comparado com a norma IEEE 112-B, a IEC 32-4 apresentou valores mais altos para o rendimento.

Bradley e outros (2006) pesquisaram os métodos IEEE 112-B, C 390 e IEC 61972 e verificaram que os métodos para a obtenção das perdas nos motores elétricos estão relacionados com a potência dos motores (potências menores possuem maiores percentagens

de perdas) e precisão dos equipamentos de medição. As perdas por dispersão são difíceis de serem medidas e o método IEC 34-2 adota um valor subestimado. Observou que os resultados obtidos usando o procedimento apresentado no método entrada e saída da norma IEE 112 foram excelentes.

Segundo Bousbaine, Low e Mccormick, 1996; as perdas por dispersão são as mais indefinidas de todas as perdas, pois são consequências de diferentes fatores. Afirmam que é de consenso geral que a determinação das perdas por dispersão em máquinas elétricas rotativas está longe de ser completa, e o resultado de qualquer determinação é subjetivo com um alto grau de incerteza.

Lu, B.; Habetler, T. G. e Harley, R. G. (2006) analisaram vários métodos intrusivos e outros não intrusivos para a obtenção do rendimento de motores elétricos e verificaram que os resultados dependem da precisão das medições, qualidade dos equipamentos. Observaram que alguns métodos são de difícil aplicação em campo, pois necessitam da instalação de equipamentos de medição sofisticados, como por exemplo, transdutor de torque.

Yoon e outros (2002) avaliaram os efeitos da temperatura na bobina do motor de indução e observaram que o rendimento é fortemente afetado pela variação da temperatura da bobina, observou-se que uma redução de 10°C na temperatura provocou um aumento de 0,25% no rendimento a 100% de carga e um aumento de 0,5% no rendimento com o motor operando com 125% de carga.

Agamloh e outros (2005) realizaram a análise de desempenho de três motores de indução baseado no método não intrusivo do IEEE 112 e verificaram que os dados obtidos no laboratório de testes de comparação, a precisão das estimativas foi boa para carregamentos acima de 50% da nominal. Se a carga do motor for inferior a 50%, as estimativas dos rendimentos devem ser consideradas com mais cuidado.

Hsu e outros (1998) realizaram a avaliação do rendimento de motores em campo baseado em diferentes métodos básicos e empíricos. Os métodos básicos são método de placa de identificação, o método do escorregamento, o método estatístico, separação de perdas, método de circuito equivalente, etc. Verificou-se que o nível de intromissão, custo e precisão são as principais considerações para a seleção de uma avaliação do rendimento em

campo. Normalmente os métodos com menores custos e com nível invasivo menor apresentam valores de rendimento com menor precisão.

Epperly e outros (1999) realizaram um estudo sobre a medição por termografia, e concluíram que o equipamento pode ser uma ferramenta extremamente eficaz para prevenir falhas de equipamentos através da manutenção preventiva e evitar paradas não programadas na linha de produção. O termovisor possui facilidade de utilização e não necessita parar a operação da máquina.

Bortoni e outros (2010) cita que o método calorimétrico tem sido por muito tempo aplicado para medir a eficiência de conversão de energia em máquinas elétricas. O número de sensores de temperatura necessários para a sua aplicação com êxito no campo consiste em um dos principais inconvenientes do método. O artigo mostra como o uso de técnicas de imagem térmica infravermelha pode reduzir os custos e o tempo necessário para a aplicação do método calorimétrico.

Szabados e Mihalcea (2001) analisaram a diferença no valor das perdas totais num motor de 10 hp operando sob condições de carga plena. Observaram que o método calorimétrico apresentou melhores resultados que o procedimento de entrada e saída convencional. Verificou que a implementação da medição calorimétrica não requer processos muito complicados ou configurações caras.

Staton e outros (2005) analisaram alguns dos aspectos mais difíceis na análise térmica do motor elétrico e verificaram que muitos dos fenômenos térmicos que ocorrem no motor elétrico são complexos e não podem ser resolvidos por meios matemáticos puros. São necessários além do conhecimento das propriedades geométricas e do material usado na construção da máquina, a utilização de poderosos programas numéricos com base em dinâmica de fluidos computacionais. Verificaram que a utilização do software *Computational Fluid Dynamics* - CFD, apesar de ser caro e exigir um alto nível de conhecimento para a sua utilização, apresentaram bons resultados nas medições.

Litwa (2010) cita que a vantagem da medição por termovisão está na sua simplicidade. A câmera termovisão é uma ferramenta perfeita para a realização de medições sem contato; porém, a confiabilidade das medidas de temperatura por termovisão depende de fatores essenciais, incluindo o coeficiente de emissividade e ângulo de visão. Um grande ângulo de

visão pode resultar em medições de temperatura imprecisas ou incorretas, dado que a câmera deve estar em uma posição ótima em relação ao equipamento observado.

Rodenas e outros (2011) realizaram um estudo de rendimento num motor de indução de 1,1 kW operando a plena carga através do uso de termografia infravermelha. Os testes concluíram que os resultados foram bons e o método pode ser considerado como uma ferramenta valiosa para realizar balanços de energia.

Carlomagno e outros (2010) analisaram os coeficientes de transferência de calor e verificaram que durante a utilização de câmeras com imagens infravermelhas, são necessários cuidados especiais com a questão dos ajustes iniciais, evitando assim, a realização de medições incorretas.

Segundo Kaplan (2007), antes de iniciar uma medição com a câmera termográfica, o operador deverá realizar as seguintes tarefas: conhecer o comportamento térmico do equipamento a ser medido, adquirir os conhecimentos necessários para a configuração da câmera, preparar o material para a realização das medições de campo, e utilizar os procedimentos operacionais adequados.

Segundo Santos (2012), a termografia por infravermelho pode estar subordinada a muitas influências e limitações; mesmo sendo a maioria delas difícil de quantificar, é possível, tendo um conhecimento prévio, reduzi-las ou evitá-las. Sendo assim, muito ainda pode ser alcançado com esforços na melhoria contínua da qualificação dos termografistas, no avanço da tecnologia e em estudos para o aprimoramento das medições realizadas pela termografia.

2.1. Eficiência energética em motores elétricos

O motor elétrico é um equipamento voltado para transformar energia elétrica em energia mecânica, mantendo sob controle todo o processo de conversão. São normalmente utilizados para acionar máquinas que requerem algum tipo de movimento controlado, como por exemplo, a quantidade de ar comprimido produzida pela máquina.

A grande importância dos motores elétricos no consumo de eletricidade verificado nas empresas e o aumento dos custos de energia, resultou no desenvolvimento dos chamados motores de alto rendimento. Estes motores, como o próprio nome indica, apresentam um

rendimento e um fator de potência mais elevados que os motores tradicionais. Segundo Bortoni e outros (2013), a utilização de motores de alto rendimento no mercado brasileiro resultou numa economia de energia de cerca de 493 GWh e uma redução na demanda de ponta de 150 MW em 2012.

2.2. Desempenho dos motores elétricos

As características de desempenho de um motor de indução trifásico são descritas por um conjunto de grandezas eletromecânicas e térmicas, as quais definem o comportamento operacional do motor sob determinadas condições de carregamento.

Sendo assim, o motor apresenta valores definidos de rendimento, fator de potência, corrente, velocidade, conjugado desenvolvido, perdas e elevações de temperatura em função da potência exigida pela carga e das condições da rede elétrica de alimentação.

As principais normas adotadas para a realização do ensaio de rendimento de motores de indução trifásicos são a IEEE Std 112, IEC Std 34-2 e a JEC Std 37. Este capítulo apresenta um detalhamento dos ensaios de motores de indução trifásicos utilizados para a obtenção dos dados do motor.

2.2.1. Considerações iniciais

Os motores elétricos são grandes consumidores de energia elétrica em alguns segmentos econômicos, como por exemplo, o industrial onde são usados para os diversos tipos de aplicações. Desta forma, pequenas melhorias no rendimento poderão resultar em quantidades razoáveis de economias de energia. A medição dos valores de rendimento é calculada de acordo com os padrões normatizados.

Atualmente existem alguns padrões para ensaio de máquinas elétricas, e para os motores de indução trifásicos; as normas mais importantes são a americana *IEEE Standard 112-Method B*, a européia IEC 60034-2 e a japonesa JEC 37. A norma IEC foi revisada para a nova IEC 61972. Os métodos de ensaio em motores resultam em valores de rendimento significativamente diferentes. Isso ocorre devido às considerações e tratamento diferenciados dados às perdas que ocorrem durante o processo de conversão de energia no interior do motor.

Os métodos de ensaio de rendimento podem ser divididos em duas principais categorias: aquela que determina o rendimento pela medida direta e outra que determina indiretamente, pelo cálculo das perdas do motor através de dados obtidos em ensaios com carga e com o rotor livre. A norma IEEE 112, método de ensaio A, B e C determina o rendimento diretamente de medidas de potência elétrica de entrada e potência mecânica de saída sob condições operacionais de carga.

A norma IEEE, método de ensaio E e F e as normas IEC e JEC usam diferentes técnicas para determinar a potência de entrada e saída, ou ambas, quando uma medida direta não está disponível. A principal diferença entre os diferentes métodos é o tratamento das perdas por dispersão em carga. A norma IEEE 112 método E e F requer um ensaio separado para as perdas por dispersão em carga enquanto a IEC 34-2 assume um valor percentual a plena carga para essas perdas. A norma JEC 37 utiliza um diagrama circular como método principal para calcular o rendimento e não inclui uma medida direta das perdas por dispersão em carga. Uma vez que as perdas por dispersão em carga representam de 8-15% de toda a perda, estimar as perdas por dispersão pode comprometer a exatidão no valor calculado por esses métodos.

2.3. Tipos de perdas

O motor é um conversor eletromecânico que, apoiado em princípios eletromagnéticos, converte energia elétrica em energia mecânica no eixo, porém esta conversão não é completa devido à existência das perdas que ocorrem no interior da máquina durante este processo. As perdas energéticas estão relacionadas com o tipo de material utilizado e a tecnologia de fabricação dos motores e são determinantes no rendimento do motor e podem ser agrupadas em quatro classes, conforme descritos a seguir:

2.3.1. Perdas por efeito Joule no estator e no rotor

As perdas por efeito Joule são as que ocorrem nos condutores do estator e do rotor pelo efeito da passagem da corrente. Para obter-se uma redução na perda Joule no estator pode-se aumentar a área transversal dos condutores de cobre do estator. Já no rotor, esta opção de melhoria deve ser analisada de forma rigorosa, pois o torque de partida do motor é proporcional à resistência do secundário.

2.3.2. Perdas no ferro

As perdas no ferro são devidas às correntes parasitas (Foucault) e às perdas por histerese. Estas perdas variam com a frequência, e como no rotor a variação do fluxo é muito pequena, estas são desprezadas no mesmo, ficando as perdas no ferro restritas somente ao estator.

i) Perdas por correntes parasitas ou Foucault

As perdas por correntes parasitas resultam da circulação das correntes induzidas nas laminações do estator. A distribuição destas correntes não é uniforme e tendem a se concentrar nas superfícies das laminações. Como as perdas por efeito Joule são proporcionais ao quadrado da corrente, tem-se que as correntes parasitas resultam em significativas perdas. Para se reduzir esta perda é necessária construir-se o núcleo com lâminas isoladas entre si, resultando numa redução no valor das correntes parasitas.

Steinmetz obteve uma equação empírica apresentada a seguir para calcular as perdas por correntes de Foucault:

$$P_f = V \cdot K_f \cdot B_m^2 \cdot f^2 \cdot e^2 \tag{2.1}$$

Onde:

P_f é a perda por corrente de Foucault [$W \cdot m^{-3}$];

K_f é uma constante que depende do material da chapa [-];

e é a espessura de laminação [m];

B_m é a densidade de fluxo máxima [$wb \cdot m^2$];

f é a frequência da variação do fluxo [Hz];

V é o volume total do material [m^3].

ii) Perdas por histerese magnética

Quando um campo magnético alternado é aplicado a um material ferromagnético, uma parcela de calor é gerada internamente como consequência de um fenômeno semelhante a

um “atrito”, verificado entre os dipolos magnéticos, para que os movimentos dos mesmos possam acompanhar as variações do campo alternado. No entanto, uma parcela dos dipolos não segue esta direção e este atraso na magnetização origina o “laço de histerese”. A Figura 2.1 mostra a curva de magnetização resultante da ação do campo magnético alternado em um núcleo.

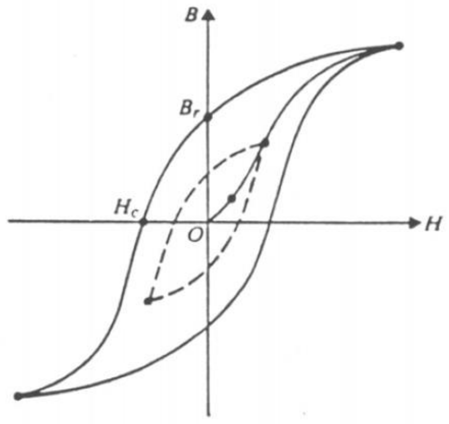


Figura 2.1 – Ciclo de histerese típico

A área interna ao laço de histerese significa as perdas inerentes ao processo, as quais são proporcionais à frequência do campo aplicado e a densidade de fluxo magnético.

No final do século XIX, Steinmetz obteve uma equação empírica que permite calcular as perdas por histerese dada por:

$$P_h = K_h \cdot B_m^{\alpha} \cdot f \cdot V \qquad (2.2)$$

Onde:

P_h é a perda por histerese [$W \cdot m^{-3}$];

K_h é a constante de perda por histerese e depende da propriedade do material. Alguns valores típicos são: aço forjado 0,025; chapa de aço silício 0,001 (DEL TORO, 1994) [-];

α é o coeficiente ou expoente de Steinmetz. Situa-se na faixa de 1,5 a 2,5 (DEL TORO, 1994) [-];

f é a frequência de variação do fluxo [Hz];

V é o volume total do material [m^3].

2.3.3. Perdas por atrito e ventilação

As perdas por atrito e ventilação ocorrem devido aos atritos nos mancais e à ventilação do motor, por isso dependem do tipo de mancal, da lubrificação, do sistema de ventilação, da velocidade de rotação e do estado de conservação do motor, no que diz respeito à limpeza do mesmo. São chamadas também de perdas mecânicas e geralmente em condições normais constituem a menor parcela de perdas em motores.

2.3.4. Perdas por dispersão em carga

Incluem todas as perdas não classificadas anteriormente e normalmente crescem com o carregamento da máquina. Alguns dos fatores que são causadores de tais perdas são: o fluxo de dispersão, a distribuição não uniforme da corrente, imperfeições mecânicas e irregularidades no entreferro.

A Figura 2.2 apresenta o esquema de um motor de indução trifásico, com as perdas que ocorrem em seu interior.

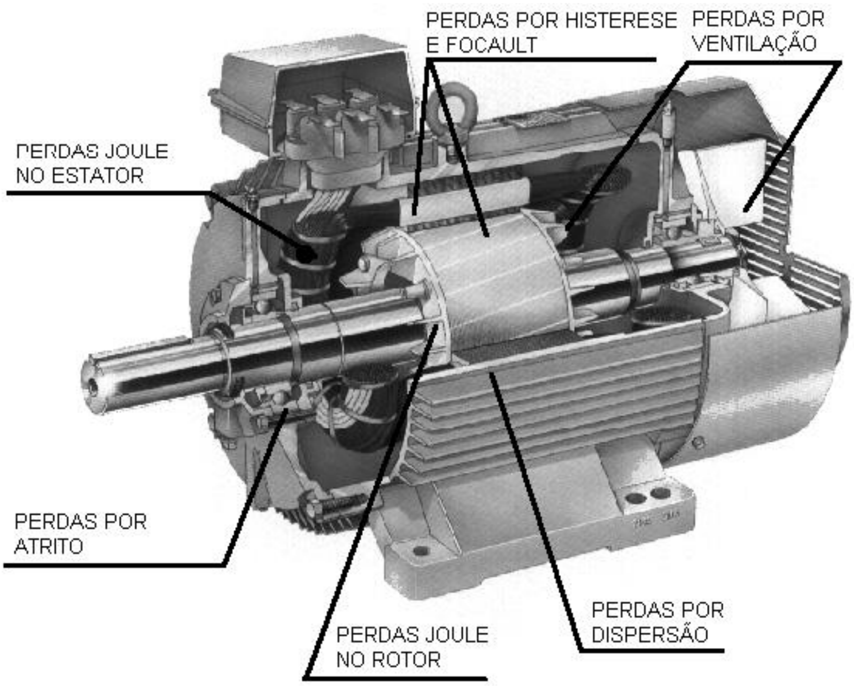


Figura 2.2 – Localização das perdas em um motor

Fonte: Bortoni (2001)

Dentre todas as classes de perdas anteriormente citadas, as perdas por dispersão em carga ou perdas adicionais são de difícil quantificação e são bastante pesquisadas no meio científico.

As perdas por dispersão em carga levam em conta vários fenômenos, tais como; a distribuição não uniforme da corrente nos enrolamentos, o efeito da saturação e as imperfeições na densidade de campo magnético (devido às ranhuras do estator e do rotor). Estas imperfeições provocam perdas nos dentes das lâminas do estator e do rotor e ocasionam perdas ôhmicas nas barras das gaiolas, associadas aos harmônicos de corrente.

As perdas que ocorrem nas partes metálicas próximas ao campo magnético de dispersão, produzidas pelas cabeças das bobinas são também computadas nas perdas por dispersão em carga.

Os elementos que mais afetam estas perdas são o projeto do enrolamento do estator, a razão entre a largura do entreferro e a abertura das ranhuras, a razão entre o número de ranhuras do estator e do rotor e as superfícies dos pacotes magnéticos do estator e do rotor.

As perdas por dispersão são as mais difíceis de serem reduzidas, porém podem apresentar uma grande contribuição para o aumento do rendimento do motor através da adoção de um projeto otimizado e com a utilização de materiais com qualidade na fabricação.

A relação entre a potência elétrica de entrada e a potência mecânica de saída do motor, considerando as perdas, é mostrada no diagrama de fluxo de potência na Figura 2.3:

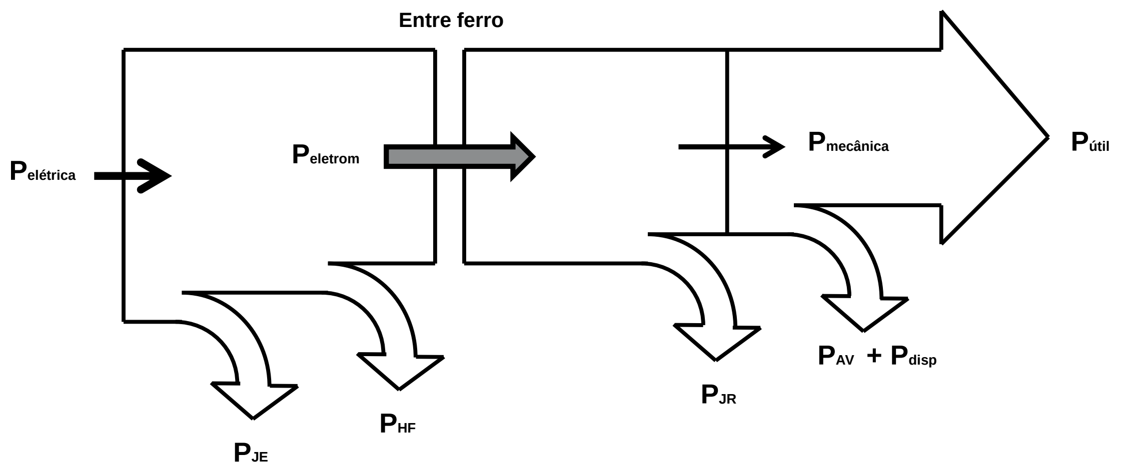


Figura 2.3 – Diagrama de Sankey para um motor de indução trifásico

As grandezas abreviadas, mostradas na figura anterior representam:

$P_{elétrica}$ – Potência elétrica de entrada;

P_{JE} – Perdas Joule no enrolamento do estator;

P_{HF} – Perdas no ferro por histerese e Foucault;

P_{JR} – Perdas Joule no enrolamento do rotor;

P_{AV} – Perdas mecânicas por atrito e ventilação;

P_{disp} – Perdas por dispersão em carga;

$P_{útil}$ – Potência mecânica de saída.

Na Figura 2.3 não estão representadas as perdas por histerese e Foucault no rotor por serem desprezíveis durante a operação. Na Tabela 2.1 estão sumarizadas as perdas que ocorrem no motor de indução, bem como sua contribuição no percentual de perdas totais.

Tabela 2.1 - Tipo e distribuição percentual de perdas totais no motor de indução

Tipo de Perda	**Percentual de contribuição**	**Como reduzir**
Perdas no ferro (núcleos)	15 a 25 %	Alongamento do núcleo e pelo uso de laminação mais fina no núcleo
Perdas mecânicas (atrito e ventilação)	5 a 15 %	Desenvolvimento de ventiladores mais eficientes, mancais e rolamentos de baixo atrito
Perdas Joule no estator	25 a 40 %	Aumento da bitola dos condutores, melhoria do desenho das ranhuras para comportar maior inserção de cobre.
Perdas Joule no rotor	15 a 25 %	Aumento da quantidade de alumínio, aumento do tamanho das barras condutoras do rotor.
Perdas por dispersão	10 a 20 %	Desenvolvimento de um bom projeto do motor, com afastamento das cabeças de bobina do rotor, tratamento térmico do rotor, enrolamento do estator em dupla camada.

Fonte: Litman (1990)

A potência elétrica absorvida da rede (P_{EL}) menos as perdas (ΣP_{erdas}) resulta na potência mecânica ($P_{útil}$) disponível no eixo do motor. O rendimento (η) será dado pela relação entre a potência mecânica e a potência elétrica. As equações a seguir explicitam estas afirmações.

$$\eta = \frac{P_{útil}}{P_{EL}} \tag{2.3}$$

$$P_{EL} = P_{útil} + \sum Perdas \tag{2.4}$$

$$\eta = \frac{P_{útil}}{P_{EL}} = \frac{P_{útil}}{P_{útil} + \sum Perdas} = \frac{P_{EL} - \sum Perdas}{P_{EL}} \tag{2.5}$$

Esta última expressão é mais usada para a determinação do rendimento, principalmente pela facilidade de se medir a potência elétrica em relação à potência mecânica.

Fora das condições nominais, a distribuição percentual das perdas é totalmente diferente, uma vez que o valor absoluto de cada componente das perdas totais varia significativamente. A Figura 2.4 mostra as características típicas de perdas de um motor de 15 cv em função do percentual de potência mecânica fornecida em seu eixo.

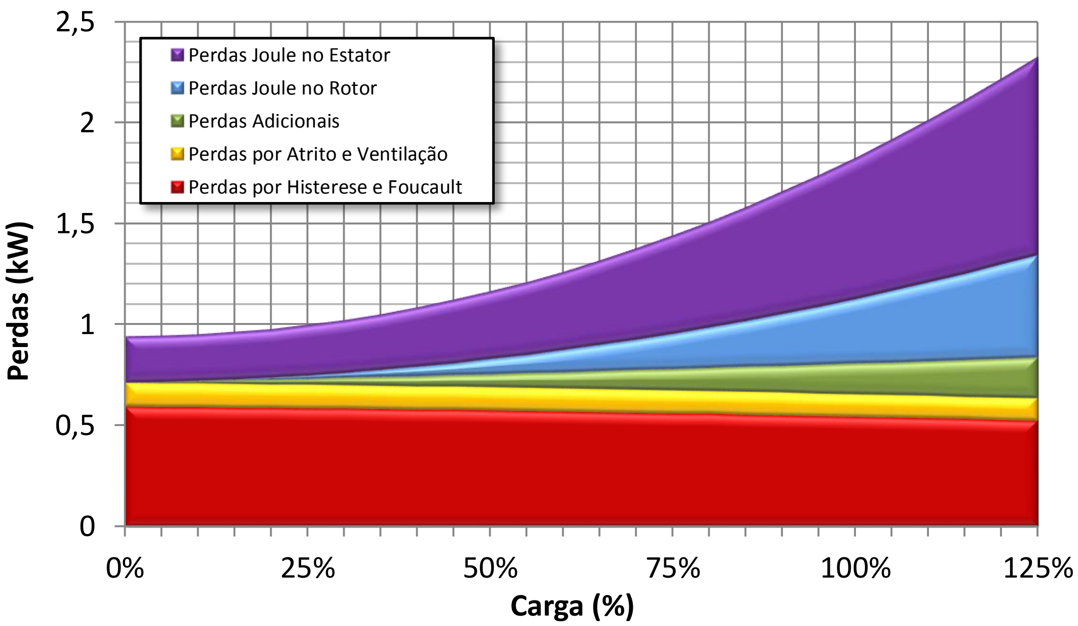


Figura 2.4 – Perdas em função da carga

Fonte: Bortoni (2007)

Enquanto cada uma destas perdas representa uma porção relativamente pequena da energia usada pelo motor, a sua totalidade representa uma parcela significativa de até 20%

da potência de entrada, onde a maior parcela dessas perdas de energia é transformada em calor.

2.4. Métodos normatizados de ensaio

Atualmente existem vários procedimentos para a realização de ensaios em motores elétricos onde se estabelecem os métodos que deverão ser adotados durante a realização dos testes, de forma que se possam determinar as características dos motores e os valores mínimos para a sua aceitação.

Os métodos de ensaio podem ser divididos em dois grupos, denominados por Método Direto e Método Indireto. No método direto, ambas as potências elétricas de entrada e mecânica de saída são medidas. Já no método indireto uma delas ou as duas não são medidas diretamente.

Os principais procedimentos para a realização de teste de motores de indução trifásicos, adotados mundialmente, são o IEC 60034-2, que é estabelecido pela IEC (*International Electrotechnical Commission*), o IEEE 112-B (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), e o JEC 37 (*Japanese Electrotechnical Commission*).

Dentro de uma mesma norma, os valores obtidos pelo método direto e indireto são de difícil comparação entre si, pois partem de hipóteses diferentes. Além disso, a escolha entre os diversos métodos descritos depende de alguns fatores como: equipamentos laboratoriais disponíveis, custo e tempo disponível para a realização do ensaio, precisão exigida, potências envolvidas, etc.

Analisando em termos da conservação de energia, é importante que seja selecionado um método que avalie com maior precisão o desempenho real do motor. O método do dinamômetro com segregação de perdas, descrito pela norma IEEE-112 - Método B mostra ser o mais indicado para isto.

A causa básica é a estimação das perdas por dispersão que são de difícil quantificação. Uma das principais diferenças entre estes procedimentos está na forma de como é determinada a perda por dispersão em carga.

A metodologia adotada na IEC assume valores percentuais da potência de entrada a 100% de carregamento para estas perdas; o método apresentado no IEEE é mais rigoroso, pois as perdas são medidas. A norma brasileira “Máquinas elétricas girantes Parte 1: Motores de indução trifásicos – Ensaios” (NBR-5383) segue o padrão apresentado na norma do IEEE, também usado no Canadá e EUA, enquanto a União Européia e a China adotam o padrão da IEC. O método da JEC 37 não considera estas perdas, resultando em um valor de rendimento superior em relação aos procedimentos da IEC e IEEE.

2.4.1. O padrão IEEE 112 - B

O método B do IEEE 112: entrada - saída com separação de perdas e medida indireta das perdas por dispersão em carga é aplicado a motores polifásicos tipo gaiola de esquilo, horizontais, na faixa de 1–250 hp. Motores verticais nesta faixa de potência também podem ser testados pelo método B, se a construção dos mancais permitirem.

Para a obtenção de resultados aceitáveis a partir da adoção deste procedimento, algumas recomendações são feitas, no que se refere ao tratamento dos dados e instrumentos e/ou equipamentos utilizados, conforme descritos a seguir:

Grandezas elétricas

Com relação às grandezas elétricas recomenda-se adotar os seguintes procedimentos:

a) Todas as grandezas medidas devem ser em valores rms;

b) A fonte de alimentação deve fornecer tensões de fase balanceada senoidais, cujo fator de variação da forma de onda da tensão não deve exceder 10%;

c) A frequência deve ser mantida com ± 0,5% do valor exigido durante a realização do ensaio; mudanças rápidas na frequência não devem ser toleradas durante os ensaios, pois tais variações afetam não somente a máquina que está sendo testada, mas também as medidas de saída dos dispositivos. Variações na frequência durante o ensaio não devem exceder 0,33% da frequência média;

d) As tensões devem ser medidas nos terminais dos motores e o desequilíbrio máximo de tensão não deve ultrapassar a 0,5% da média das tensões;

e) As correntes de cada fase do motor devem ser medidas e se os valores forem diferentes o valor da corrente a ser considerado deve ser a média aritmética;

f) A potência de entrada da máquina trifásica deve ser medida por dois wattímetros monofásicos, conectados segundo o método dos dois wattímetros, ou por um wattímetro polifásico, ou por três wattímetros monofásicos;

g) Tacômetros analógicos não são suficientemente precisos para medição do escorregamento; são recomendados utilizar estroboscópio ou tacômetros digitais;

h) Deve-se adotar procedimento referente à segurança, pois estão envolvidas forças, tensões e correntes que podem ser perigosas à saúde;

i) Os instrumentos indicados devem possuir um registro de calibração, dentro do prazo de 12 meses do ensaio, indicando limites de erro não maiores que ±0,5% da máxima escala para ensaios gerais ou não maiores que ±0,2% da máxima escala, requerido pelo método B do ensaio de rendimento para manter a precisão e repetição do resultado dos ensaios;

j) Os erros dos transformadores de corrente e potencial usados não devem ser maiores que 0,5% para ensaios gerais ou não maiores que ±0,3%, exigido pelo ensaio de rendimento método B para manter a precisão e repetição dos resultados do ensaio.

k) As resistências das bobinas devem ser obtidas segundo os procedimentos apresentados na IEEE Std 118-1997;

l) Correção para uma temperatura específica: quando a resistência, R_t, de um enrolamento foi determinada pelo ensaio na temperatura t_t, a resistência deve ser corrigida para uma temperatura especificada, t_s, pela equação a seguir:

$$R_s = \frac{R_t \cdot (t_s + k)}{(t_s + k)} \qquad (2.6)$$

Onde:

R_s é a resistência do enrolamento, corrigida para a temperatura especificada t_s [Ω];

t_t é a temperatura do enrolamento quando a resistência foi medida [°C];

R_t é o valor medido da resistência do enrolamento à temperatura t_t [Ω];

t_s é a temperatura especificada para correção da resistência [°C];

k é a constante térmica do material; sendo igual a 234,5 para enrolamento de cobre e 225 para enrolamento de alumínio.

Grandezas mecânicas

Durante a realização da medição das grandezas mecânicas deve-se tomar os seguintes cuidados:

a) Potência: medições de potência mecânica deverão ser realizadas com cuidado e exatidão. Se forem utilizadas medidas de saída do dinamômetro, as perdas no acoplamento e por atrito nos mancais devem ser compensadas. Deve ser usado dinamômetro de tamanho correto para que as perdas no acoplamento, atrito e ventilação do dinamômetro, medidas à velocidade nominal da máquina sendo testada, não seja maior que 15% da saída nominal da máquina.

O erro da instrumentação usada para medir torque mecânico não deve ser maior que ± 0,2% da máxima escala, a fim de manter exatidão e repetibilidade dos resultados do ensaio.

Quando for usado um dinamômetro no ensaio, a potência no eixo do dinamômetro, dado em watts, é obtida pela seguinte equação:

$$P_{mec} = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot M \cdot n \tag{2.7}$$

Onde:

M é o torque [N·m];

n é a velocidade do motor [rpm].

b) Velocidade e escorregamento: tacômetros analógicos não são suficientemente exatos para medida de escorregamento. Portanto, estroboscópio ou tacômetros digitais são recomendados.

A instrumentação usada para medir a velocidade não deve possuir um erro maior do que ±1,0 rpm da leitura para manter a exatidão e a repetibilidade dos resultados obtidos no ensaio.

O escorregamento é a diferença entre a velocidade síncrona (n_s) e a velocidade (n) medida dado em rpm; normalmente o escorregamento é expresso em pu, conforme apresentado na equação seguinte:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \tag{2.8}$$

As medidas de escorregamento devem ser corrigidas para uma temperatura específica do estator, conforme a equação apresentada a seguir.

$$s_s = \frac{s_t \cdot (t_s + k)}{(t_t + k)} \tag{2.9}$$

Onde:

s_s é o escorregamento corrigido para uma temperatura específica do estator, t_s;

s_t é o escorregamento medido na temperatura dos enrolamentos do estator, t_t;

t_s é a temperatura especificada para a correção da resistência [ºC];

t_t é a temperatura nos enrolamentos do estator durante o ensaio em carga [ºC].

2.4.1.1. Ensaio com rotor livre

O ensaio com rotor livre é realizado para obtenção das perdas no núcleo e por atrito e ventilação.

O motor deve ser alimentado com tensão e frequência nominais sem qualquer acoplamento mecânico no seu eixo. Para se assegurar o valor correto das perdas por atrito e ventilação, o motor deverá ficar em rotação livre até a potência de entrada se estabilizar. A estabilização é atingida quando duas medições da potência de entrada, num intervalo de meia hora, não variarem mais do que 3%. A corrente é medida em cada fase. O valor médio destas correntes é a corrente em vazio, I_0.

Perdas com rotor livre

Esta perda é a diferença entre a potência de entrada, P_{EL} e as perdas Joule no estator, P_{JE} (RI^2, na temperatura do ensaio). É igual a soma das perdas mecânicas (atrito e ventilação) e no núcleo (histerese e correntes parasitas).

A perda com rotor livre será denominada de P_0, cujo valor é obtido da equação seguinte.

$$P_0 = P_{EL} - P_{JE} = P_{AV} + P_{HF} \qquad (2.10)$$

A separação entre as perdas no núcleo e por atrito e ventilação é feita medindo-se a tensão, a corrente e a potência de entrada na frequência nominal e, reduzindo-se a tensão de alimentação, desde 125% do valor nominal até o ponto onde uma redução seguinte da tensão provocará um aumento da corrente.

Perdas Mecânicas

A potência de entrada menos as perdas Joule do estator deverá ser plotada em função da tensão aplicada. A curva obtida é extrapolada até o valor de tensão zero. O ponto obtido na condição de tensão zero é a perda por atrito e ventilação, associada a fenômenos puramente mecânicos.

A interseção pode ser obtida com maior precisão se os pontos forem plotados versus o quadrado da tensão, para os valores da região de menores tensões. Estas perdas serão denominadas por P_{AV}. A Figura 2.6 apresenta as perdas por atrito e ventilação.

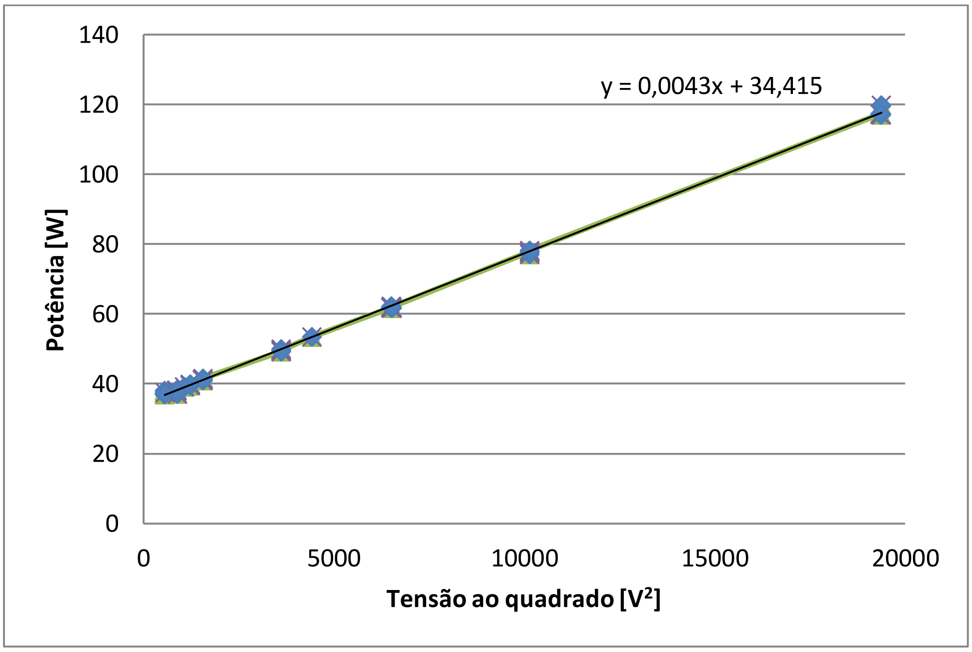


Figura 2.5 – Perdas por atrito e ventilação

Perdas no Núcleo

Com o ensaio a tensão nominal, as perdas no núcleo são obtidas pela diferença entre as perdas com rotor livre (atrito, ventilação e no núcleo) e as perdas mecânicas, apresentadas anteriormente. Estas perdas serão denominadas por P_{HF}.

$$P_{HF} = P_0 - P_{AV} \tag{2.11}$$

2.4.1.2. Ensaio em carga

Neste ensaio o motor deve ser acoplado ao dinamômetro. Inicialmente é feito um ensaio com o motor acionando o dinamômetro sem alimentar qualquer carga elétrica. Este procedimento permite calcular a correção considerando os valores medidos dos conjugados em carga, compensando as perdas por atrito e ventilação do dinamômetro quando não é usado um transdutor de conjugado no acoplamento entre o motor e o dinamômetro.

Esta correção será dada por:

$$\gamma = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{(W_X - W_Y)}{n} - M \tag{2.12}$$

Onde:

γ é a correção na leitura para o valor de conjugado;

n é a velocidade durante o ensaio [rpm];

M é o conjugado medido durante o ensaio [N·m];

W_X é a potência eletromagnética em carga [W];

W_y é a potência eletromagnética com rotor livre [W].

$$W_X = (P_{EL_X} - P_{JE_X} - P_{HF}) \cdot (1 - s_x) \tag{2.13}$$

Onde

P_{EL_X} é a potência de entrada, solicitada à rede pelo motor estando acoplado ao dinamômetro sem carga [W];

P_{JE_X} são as perdas Joule no enrolamento do estator sem carga [W];

P_{HF} são as perdas no núcleo [W];

s_X é o escorregamento [pu].

$$W_Y = (P_{EL_0} - P_{JE_0} - P_{HF}) \tag{2.14}$$

P_{EL_0} é a potência de entrada consumida pelo motor girando com rotor livre [W];

P_{JE_0} são perdas Joule no enrolamento do estator durante o ensaio de rotor livre [W].

Em seguida, o motor deverá ser ensaiado em 6 condições de carregamento, em intervalos aproximadamente iguais. A menor carga não deve ser inferior a 25% da sua potência nominal, o ponto de operação com carregamento de 100% deve ser incluído e, a máxima carga não deve ser superior a 150% da potência nominal do motor. No carregamento do motor, deve-se partir da mais alta carga e reduzir-se o carregamento segundo os valores de carga definidos. Havendo possibilidade, em geral são escolhidos os pontos de 150%, 125%, 100%, 75%, 50% e 25% da potência nominal.

São realizadas as leituras de potência de entrada, corrente, tensão (que deve ser mantida sempre no valor nominal), frequência, velocidade, conjugado, temperatura ambiente e temperatura do enrolamento do estator para cada ponto de carga.

A potência mecânica de saída para cada condição de carga é obtida pela equação (2.7) descrita anteriormente.

Para cada condição de carga é feita a diferença entre a potência de entrada e a potência mecânica de saída. Este valor é conhecido por perda aparente total.

Perdas por Efeito Joule no enrolamento do estator

A perda Joule no enrolamento do estator (P_{JE}), para máquinas trifásicas, é definida pela seguinte equação.

$$P_{JE} = 3 \cdot I^2 \cdot R \tag{2.15}$$

Onde:

I é o valor rms médio da corrente medida para cada condição de carga [A];

R é a resistência DC por fase do motor corrigida para a temperatura especificada [Ω].

Perdas por Efeito Joule no rotor

As perdas Joule no rotor (P_{JR}) devem ser determinadas do escorregamento, quando o escorregamento é precisamente determinado, usando a equação descrita a seguir:

$$P_{JR} = (P_{EL} - P_{JE} - P_{HF}) \cdot s \tag{2.16}$$

Onde:

P_{JR} é a perda Joule (I^2R) no enrolamento do rotor [W];

P_{EL} é a potência de entrada [W];

P_{JE} é a perda Joule no enrolamento do estator [W];

P_{HF} é a perda no núcleo por Histerese e Foucault [W];

s é o escorregamento [pu].

Observa-se que as perdas por Efeito Joule no rotor não são calculadas na forma $R_2 \cdot I_2^2$ pois são desconhecidos os valores de R_2 e I_2 no rotor. Estas perdas são proporcionais ao escorregamento e, então, este parâmetro deve ser corrigido para a temperatura especificada. Esta correção é análoga àquela feita para a resistência do estator, conforme a Equação (2.9).

Perdas por dispersão em carga

As perdas por dispersão são calculadas separadamente para cada valor de carga. Seu valor é dado pela diferença entre a perda aparente total (diferença entre potência ativa de entrada e potência mecânica de saída em cada condição de carga) e o somatório das seguintes perdas: perdas Joule no estator na temperatura do teste, perdas no núcleo, perdas mecânicas e perdas Joule no rotor correspondente a cada valor de escorregamento. Estas perdas serão denominadas por P_{disp}.

Os valores de P_{disp} plotados versus os conjugados correspondentes apresentam um comportamento quadrático que deverão se aproximar de uma equação dada por:

$$P_{disp} = A \cdot M^2 + B \qquad (2.17)$$

onde:

P_{disp} são as perdas por dispersão [W];

M é o conjugado [N·m];

A é o coeficiente angular da equação;

B é a intercessão da reta com o eixo de $P_{disp.}$

Se os mesmos valores de P_{disp} forem plotados versus o quadrado dos conjugados correspondentes, os pontos obtidos deverão se aproximar de uma reta, onde A será o coeficiente angular da reta e B, a intercessão da reta com o eixo de P_{disp}.

Como as perdas por dispersão dependem da carga e, carga nula corresponde a conjugado nulo, as perdas por dispersão são corrigidas para a seguinte expressão:

$$P_{disp} = A \cdot M^2 \qquad (2.18)$$

Onde A é o parâmetro indicado na equação (2.17).

Isto corresponde a deslocar paralelamente a reta para a origem.

A determinação do coeficiente A pode ser obtida usando-se uma análise de regressão linear, tal que:

$$A = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^{n} M_i \cdot P_{disp_i} - \sum_{i=1}^{n} M_i \cdot \sum_{i=1}^{n} P_{disp_i}}{m \cdot \sum_{i=1}^{n} M_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} M_i \right)^2} \qquad (2.19)$$

Onde:

m é o número de condições de carga;

M_i são valores de conjugado para cada condição de carga;

$P_{disp\,i}$ são valores de perdas adicionais para cada condição de carga.

Para se trabalhar com um valor de A coerente, calcula-se também um Fator de Correlação, r, dado por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(M_i - \overline{M}) \cdot (P_{disp_i} - \overline{P}_{disp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(M_i - \overline{M})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_{disp_i} - \overline{P}_{disp})^2}} \qquad (2.20)$$

Onde os valores de M_i e $P_{disp\,i}$ já foram definidos anteriormente.

Os valores $\overline{M}$ e $\overline{P}_{disp}$ são os valores médios dados por:

$$\overline{M} = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i}{m} \qquad (2.21)$$

$$\overline{P}_{disp} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{disp_i}}{m} \qquad (2.22)$$

Após a realização dos cálculos deve-se analisar os valores de A e r obtidos, que serão aceitos quando A for positivo e r maior que 0,9. Se A é negativo ou se r é menor do que 0,9, deve-se desprezar o pior ponto. Se persistir do coeficiente A ser negativo ou r ser menor do que 0,9, os testes deverão ser repetidos; pois grandes erros poderão estar ocorrendo nas medições e/ou instrumentos devendo-se, portanto, realizar uma investigação dos procedimentos utilizados. A Figura 2.6 apresenta os resultados obtidos no ensaio de um motor de indução.

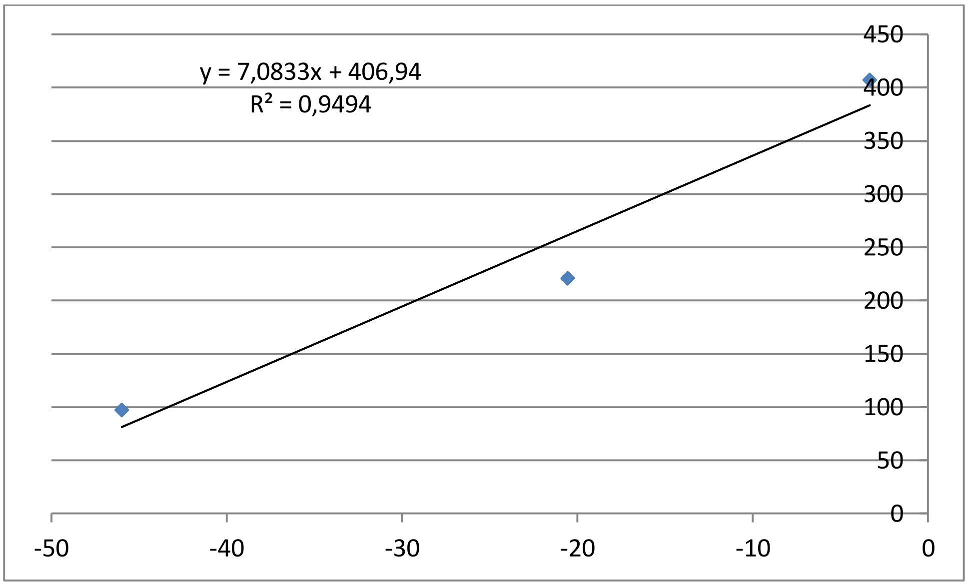


Figura 2.6 – Perdas por dispersão em função do torque

Obtendo-se então um valor coerente de A, as perdas por dispersão corrigidas para cada condição de carga serão calculadas por:

$$P_{disp} = A \cdot M^2 \tag{2.23}$$

Onde:

P_{disp} são as perdas por dispersão [W];

A é o parâmetro positivo dado pela Equação (2.19) com a condição do fator de correlação r obtido pela Equação (2.20) ser maior ou igual a 0,9;

M é o conjugado [N·m].

Tendo-se então a potência de entrada e o valor das perdas corrigidas, pode-se determinar o rendimento do motor em cada condição de carga do motor analisado.

Determinação do rendimento

O rendimento do motor é dado pela razão entre a potência de saída e a potência total de entrada. A potência de saída é igual à potência de entrada menos as perdas. Portanto, se

duas das três variáveis (saída, entrada ou perdas) são conhecidas, o rendimento pode ser determinado pela equação (2.5) apresentada anteriormente.

2.4.2. A norma IEC 60034-2

2.4.2.1. Princípio geral

A norma IEC recomenda que os instrumentos de medida e seus acessórios, tal como os transformadores de medição, shunts e pontes usadas durante os ensaios devem ter uma classe de precisão não superior a 1,0%. Instrumentos para determinação da resistência DC devem ter uma classe de precisão não superior a 0,5%.

A rotação deve ser medida através de estroboscópico ou tacômetro digital. Durante a medição do escorregamento, a velocidade síncrona deve ser determinada a partir da frequência de alimentação durante o ensaio.

Ensaio de rotor livre com tensão nominal

As perdas de rotor livre compreendem os seguintes tipos de perdas:

- Perdas no ferro e perdas por dispersão com rotor livre;
- Perdas devido ao atrito dos mancais;
- Perda total por ventilação na máquina, incluindo a potência absorvida no ventilador.

A soma das perdas constantes é determinada através do motor funcionando com o rotor livre. A máquina é alimentada em sua tensão e frequência nominais. A potência absorvida, subtraída das perdas Joule no estator ($R_1 \cdot I_1^2$) fornece as perdas constantes totais. As perdas Joule no rotor são desprezadas. A equação apresentada a seguir fornece as perdas constantes no motor:

$$P_{cte} = P_{EL} - P_{JE} \tag{2.24}$$

Onde:

P_{cte} são as perdas constantes [W];

P_{EL} é a potência elétrica absorvida da rede[W];

P_{JE} é a perda Joule no enrolamento do estator ($R_1 \cdot I_1^2$)[W].

Ensaio em carga

As perdas existentes quando o motor está operando em carga compreendem os seguintes tipos:

Perdas Joule no enrolamento do estator (P_{JE});

Perdas Joule no enrolamento do rotor (P_{JR});

Perdas por dispersão em carga.

As perdas Joule no estator são calculadas a partir da medida da resistência do enrolamento primário (estator), usando corrente DC e corrigidas à temperatura de referência, e a partir da corrente correspondente à carga em que as perdas estão sendo calculadas, conforme a equação seguinte.

$$P_{JE} = I^2 \cdot R \qquad (2.25)$$

As perdas Joule no rotor são tomadas como sendo igual ao produto do escorregamento e a potência total transmitida ao enrolamento secundário, subtraída das perdas no núcleo e das perdas no enrolamento primário, conforme equação apresentada a seguir.

$$P_{JR} = (P_{EL} - P_{JE} - P_{cte}) \cdot s \qquad (2.26)$$

As perdas em carga por dispersão são as perdas introduzidas pela carga no ferro e em outras partes metálicas, exceto nos condutores. Constituem ainda uma parcela às perdas por dispersão, as perdas causadas por correntes parasitas nos condutores dos enrolamentos do rotor e do estator.

Tais perdas variam com o quadrado da corrente do estator, segundo a norma IEC 60034-2, seu valor à carga nominal é igual a 0,5% da potência de entrada nominal.

Rendimento

A razão da potência de saída pela entrada, expressa na mesma unidade e geralmente dada como uma porcentagem, são obtidas pelas equações (2.3) e (2.5) apresentadas anteriormente. De um modo geral, a principal diferença que pode ser verificada na determinação do rendimento de motores de indução trifásicos em ambos os procedimentos descritos está na determinação das perdas por dispersão em carga.

3. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é a energia térmica resultante devido à existência de uma diferença de temperatura entre dois corpos ou meios, com isso, quando existir corpos ou meios com temperaturas diferentes ocorrerá a transferência de calor do corpo ou meio de maior temperatura para o de menor temperatura.

Os mecanismos físicos que permitem analisar a transferência de calor permitindo quantificar a energia transferida na unidade de tempo são: condução, radiação e convecção. A condução e a radiação dependem da diferença de temperatura, a convecção depende da diferença de temperatura e também do transporte de massa.

3.1. Processo de elevação de temperatura do motor

Do ponto de vista físico, o motor de indução trifásico pode ser considerado, de forma simplificada, como sendo um dispositivo possuindo fontes de calor (enrolamento do estator, barras do rotor e núcleo magnético) e um dissipador de calor (ar de refrigeração que circula no entreferro e no entorno da carcaça).

O comportamento térmico do motor varia de acordo com o regime de carga e, particularmente, com as correntes de sobrecarga. Quando energizados, os motores de indução possuem três estágios de operação:

- Partida ou travado;
- Processo de aceleração;
- Regime permanente.

Na partida, a corrente assume valores da ordem de 5 a 8 vezes a corrente nominal. Nesta condição operacional, todo o calor desenvolvido no período é utilizado para elevar a temperatura do condutor e sua isolação, pois não há tempo suficiente para a realização da troca de calor entre os enrolamentos do rotor e estator com o meio ambiente. Durante este período a suportabilidade do motor é definida pelas barras do rotor, as quais podem ocasionar danos oriundos de fenômenos de expansão e deformação.

Na condição de regime permanente, a limitação térmica é imposta pelos enrolamentos do estator, onde ocorre a maior concentração de calor. Se a temperatura máxima dos condutores é ultrapassada, pode ocorrer a deterioração do seu isolamento e, como consequência, a manifestação de curto-circuito. A Tabela 3.1 apresenta as classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura conforme a NBR 17094.

Tabela 3.1 – Classes de isolamento dos motores de indução

Classe de isolamento	A	E	B	F	H
Temperatura ambiente (ºC)	40	40	40	40	40
Elevação de temperatura (método da resistência) (ºC)	60	75	80	105	125
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média (ºC)	5	5	10	10	15
Temperatura do ponto mais quente (ºC)	105	120	130	155	180

Fonte: NBR 17094 (2008)

Destacam-se algumas observações com relação ao fluxo de calor dentro do motor onde, na operação com rotor livre, o calor é transferido, principalmente, do núcleo para os enrolamentos. Em carga, o fluxo de calor dá-se de forma oposta, ou seja, do enrolamento para o núcleo e deste para o ambiente. Estas colocações evidenciam que a análise matemática exata do processo de aquecimento em máquinas de indução é altamente complexa.

Assim, visando simplificar os cálculos, o motor será considerado com um corpo homogêneo, tendo, portanto, a mesma temperatura em todas as suas partes. O regime de trabalho do motor será contínuo, isto é, operando com carga constante durante um tempo suficientemente longo para que a sua temperatura se estabilize em um valor correspondente ao equilíbrio térmico.

Os símbolos que serão utilizados nas equações que se seguem têm o seguinte significado:

Q é o calor total gerado pelas perdas do motor, por unidade de tempo, em Joule/s ou watt;

C é a capacidade calorífica do motor, isto é, a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do motor de 1 °C, em Joule/ °C;

ς é o coeficiente de transmissão de calor do motor, isto é, a quantidade de calor que o motor dissipa no ar ambiente por unidade de tempo, por unidade de temperatura (temperatura do motor - temperatura do meio ambiente), medido em Joule/s ·°C, ou seja, watt/°C;

θ é a elevação de temperatura do motor acima da temperatura ambiente, em °C.

A equação fundamental da conservação de energia sobre a qual se baseia o estudo da elevação de temperatura durante a operação de um motor pode ser escrita da seguinte forma:

$$Q = Q_a + Q_d + Q_{irrad} \tag{3.1}$$

Em que:

Q é o calor gerado pelas perdas.

Q_a é o calor absorvido pelo motor para elevar sua temperatura acima da temperatura ambiente.

Q_d é o calor dissipado para o meio ambiente.

Q_{irrad} é o calor irradiado para o meio ambiente.

Desconsiderando a o calor irradiado, a equação (3.1) pode ser escrita, sob a forma diferencial, como se segue:

$$Q_{dt} = C \cdot d\theta + \varsigma \cdot \theta \cdot dt \tag{3.2}$$

Cuja solução irá representar a equação da elevação de temperatura:

$$\theta = \frac{Q}{\varsigma} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\varsigma}{C} \cdot t}\right) + \theta_0 \cdot e^{-\frac{\varsigma}{C} \cdot t} \tag{3.3}$$

A curva de elevação de temperatura do motor pode ser considerada como sendo a soma de duas curvas: Uma de aquecimento, quando o motor aciona uma carga que produz a máxima elevação de temperatura Q/ς e outra curva de resfriamento, quando o motor é desligado da rede e está com uma elevação de temperatura inicial igual a θ.

A condição mais comum é aquela em que a elevação de temperatura inicial é zero, isto é, a temperatura inicial do motor é igual à temperatura do meio ambiente Neste caso, a equação (3.3) irá representar a equação da elevação de temperatura sem elevação inicial e será igual a:

$$\theta = \frac{Q}{\varsigma} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\varsigma}{C} \cdot t}\right) \tag{3.4}$$

Quando t = ∞ tem-se θ = Q/ς, que será indicado por θm e representa o máximo valor que a elevação de temperatura do motor pode atingir para aquela condição de carga significando que o motor atingiu a sua condição de operação em regime estável onde, todo o calor gerado pelas perdas é dissipado para o meio ambiente e o motor atingiu o ponto de equilíbrio térmico.

A Figura 3.1 mostra as curvas obtidas a partir das equações (3.3) e (3.4), curvas 1 e 2, respectivamente.

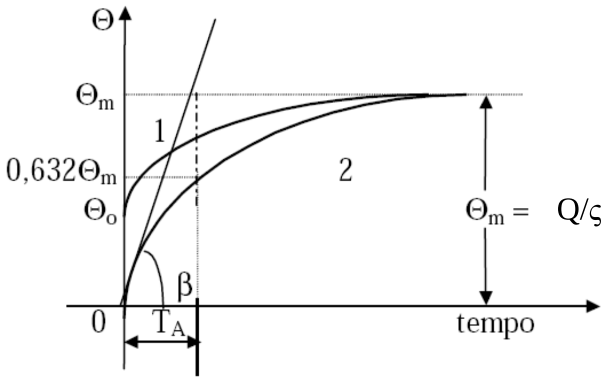


Figura 3.1 – Curva de elevação de temperatura de um motor

Fonte: Pazzini (2007)

Considerando t = C/ς, tem-se $\theta = \frac{Q}{\varsigma} \cdot (1 - e^{-1}) = 0{,}632\ \theta m$

A relação C/ς é denominada como sendo a constante de tempo térmica de aquecimento e será representada por T_A e representa o tempo que o motor necessita para atingir a 63,2% do valor final da elevação de temperatura correspondente à sua operação em estado de equilíbrio térmico, conforme indica a Figura 3.1. O valor de T_A representa a eficácia do sistema de refrigeração do motor.

A constante de tempo térmica não constitui um dado de catálogo e, em muitas situações, são obtidas nos ensaios de laboratório ou de campo para determinação do seu valor. Introduzindo θ_m e T_A na equação (3.4) tem-se a elevação de temperatura em função da constante de tempo:

$$\theta = \theta_m \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_A}}) \tag{3.5}$$

A condição de equilíbrio térmico é atingida após um tempo teoricamente igual a infinito que na prática é atingida quando o tempo transcorrido, após o motor ter sido ligado, for igual a 4 ou 5 vezes T_A.

Por exemplo, quando t for igual a $5T_A$ na equação (3.5), resultará um valor igual a 0,9933 θm para a elevação de temperatura. Esta condição de operação onde o motor atinge a sua temperatura de equilíbrio é designada, pela Norma Brasileira NBR17094, como Regime Contínuo S1.

Assim, das equações (3.3) e (3.4), pode-se concluir que existe uma relação direta entre as elevações de temperatura e as perdas que ocorrem no motor. Supondo uma quantidade de calor gerada na condição nominal de operação igual à Qn, produzida pela perda nominal ΔPnom, à qual corresponde a elevação de temperatura máxima θm; com isso, uma quantidade de calor Q, produzida pela perda ΔP, corresponde a uma elevação de temperatura θ, desta forma, tem-se a seguinte relação entre as perdas, calor gerado e elevação da temperatura:

$$\frac{\theta}{\theta_m} = \frac{Q}{Q_n} = \frac{\Delta P}{\Delta P_{nom}} \tag{3.6}$$

Este modelo teórico do processo de aquecimento do motor serve para o entendimento da elevação de temperatura até atingir sua temperatura de equilíbrio, onde o aumento de temperatura está relacionado diretamente com as perdas do motor.

A seguir será apresentado um breve relato dos mecanismos de transmissão de calor: condução, convecção e radiação presentes no motor de indução.

3.2. Transmissão de calor por condução

Na condução o processo ocorre quando a energia é transferida de uma região de alta temperatura para outra mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato direto. Este mecanismo físico pode ser caracterizado como sendo a transferência de energia das partículas mais energéticas para outras com menos energia.

A relação básica para a transmissão de calor por condução foi proposta pelo cientista francês J. B. Fourier, que estabeleceu que o fluxo de calor por condução unidirecional em um material pode ser expresso pela seguinte relação:

$$q = -\lambda \cdot S \cdot \frac{d\theta}{dx} \tag{3.7}$$

Onde:

q é a taxa de transferência de calor [W];

S é a área pela qual ocorre a transferência de calor, medida perpendicularmente à direção do fluxo de calor [m^2];

λ e a condutividade térmica do material [W/m ºC];

$\frac{d\theta}{dx}$ é o gradiente de temperatura na seção e na direção x [ºC/m].

O sinal negativo da expressão anterior é inserido para satisfazer o segundo princípio da termodinâmica, ou seja, o calor deve fluir no sentido da temperatura decrescente. Para o caso simples de fluxo de calor em regime permanente, através de uma parede plana, o gradiente de temperatura e o fluxo de calor não variam com o tempo e, a área da seção transversal na direção do fluxo é uniforme. As variáveis da equação podem ser separadas e a equação resultante para os limites de integração θ_{quente} para x = 0 e θ_{frio} para x = L, representa a Lei de Fourier para uma parede plana:

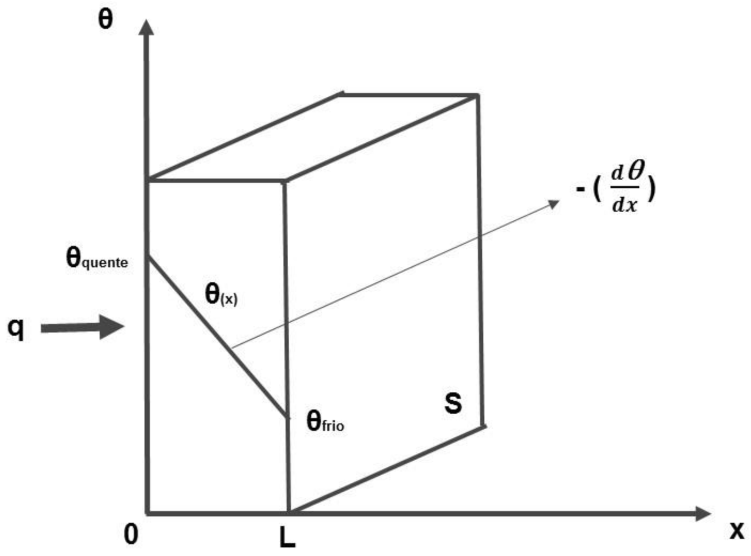


Figura 3.2 – Condução de calor numa superfície plana

$$q = \frac{S \cdot \lambda}{L} \cdot (\theta_{quente} - \theta_{frio}) = \frac{\Delta\theta}{L/_{S \cdot \lambda}} \tag{3.8}$$

Na equação (3.8), $\Delta\theta$ é a diferença de temperatura causada pelo fluxo de calor, e $L/S \cdot \lambda$ representa a resistência térmica que a parede oferece a passagem do fluxo de calor por condução.

No motor de indução, a transferência de calor por meio da condução, ocorre nos enrolamentos do estator e rotor, núcleo magnético e na carcaça. No que se refere à direção do fluxo de calor, ela se manifesta nas direções axial e radial, com predominância desta última devido à existência do ventilador.

3.3. Transmissão de calor por convecção

A convecção pode ser definida como o processo pelo qual energia é transferida das porções quentes para as porções frias de um fluido através da ação combinada de condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura natural ou forçada.

A transferência de calor por convecção entre uma superfície e um fluido pode ser calculada através da Lei de Newton do resfriamento:

$$q_{conv} = h \cdot S \cdot \Delta\theta \tag{3.9}$$

Onde:

q_{conv} é a taxa de transferência de calor [W];

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m^2 ºC];

$\Delta\theta$ é a diferença de temperatura [ºC];

S é a área [m^2].

O parâmetro "h" não é obtido com facilidade, pois a convecção é um fenômeno bastante complexo. Para alguns sistemas é possível o cálculo analítico, e para outras situações mais complexas, a determinação é experimental ou numérica. No entanto, pode-se afirmar que este parâmetro apresenta dependência com as seguintes variáveis: viscosidade do fluido, condutividade térmica, calor específico, densidade e velocidade, além de depender da geometria da superfície do sólido.

O estudo do processo de transmissão de calor por convecção no motor de indução é uma tarefa complexa. Este ocorre, principalmente, no ar interno ao motor (laterais), entre o fechamento lateral (tampas laterais) e o ar externo, no entreferro e, finalmente, entre a carcaça do motor e o ar externo ambiente.

3.4. Transmissão de calor por radiação

Na radiação o processo acontece quando o calor é transferido de uma superfície em alta temperatura para outra com temperatura mais baixa onde as superfícies estão separadas no espaço, ainda que exista vácuo entre elas. A energia transferida é chamada como sendo radiação térmica e é realizada sob a forma de ondas eletromagnéticas.

Considerações e conceitos da termodinâmica mostram que um radiador ideal ou corpo negro, emite energia numa taxa proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo. Quando dois corpos trocam calor por radiação, a troca líquida de calor é proporcional à diferença em θ^4 e é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann apresentada a seguir:

$$q_{rad} = S \cdot \xi \cdot \varepsilon \cdot (\theta_1^4 - \theta_2^4) \tag{3.10}$$

Onde:

q_{rad} é a taxa de transferência de calor por radiação [W];

s é a área pela qual ocorre a transferência de calor, medida perpendicularmente à direção do fluxo em calor [m^2];

θ_1 é a temperatura da superfície [K];

θ_2 é a temperatura refletida [K];

ξ é a constante de Stefan-Boltzmann igual a $5{,}669 \cdot 10^{-8}$ [$W/(m^2 K^4$]

ε é a emissividade da superfície cinza, ou seja, razão entre a emissão da superfície cinza e a emissão do corpo negro à mesma temperatura.

3.4.1. Medição e detecção de radiação

Todos os objetos acima do zero absoluto (0 K ou -273,16°C) emitem radiação térmica devido à agitação térmica de átomos e moléculas dos quais são constituídos. Quanto maior essa agitação, mais quente se encontra o objeto e mais radiação ele emite.

A teoria da transferência de calor por radiação teve um grande marco a partir de 1860, quando Gustav Kirchhoff demonstrou que um bom absorvedor de radiação é também um bom emissor. Ele propôs o termo *Corpo Negro* para se referir a um objeto que absorve toda a energia radiante que incide sobre o mesmo. A partir das equações de Maxwell em 1873, concluía-se que luz visível e radiação dos corpos aquecidos estavam relacionadas (SINISCALCHI, 2009).

A radiação térmica pode ser emitida nas faixas de ultravioleta, visível, infravermelho e até na faixa de microondas do espectro eletromagnético. Entretanto, para temperaturas típicas encontradas na Terra, a maior parte da radiação térmica é emitida dentro da faixa de infravermelho, (CHRZANOWSKI, 2001). Assim sendo, os termovisores são fabricados com detectores que respondem a essa faixa do espectro.

A termografia detecta a radiação infravermelha emitida pelo objeto inspecionado, que é invisível ao olho humano, e a transforma em imagens térmicas visíveis, com a possibilidade de convertê-la em leituras de temperatura, (MALDAGUE & MOORE, 2001).

Dentro do espectro eletromagnético, Figura 3.3, a radiação infravermelha está localizada entre a região de radiação visível e a região de radiação de microondas. Essas

regiões são divididas arbitrariamente, dependendo dos métodos utilizados para produção e detecção da radiação.



Figura 3.3 – Espectro eletromagnético

Fonte: Santos (2006)

A radiação Infravermelha, assim como as radiações das diferentes regiões do espectro eletromagnético, basicamente obedecem às mesmas leis. Propagam-se em linha reta, refletem, refratam, são absorvidas, interferem, apresentam espalhamento de feixe, podem ser enfocadas e viajam, no vácuo, a uma velocidade de aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s (SANTOS, 2006).

Em 1879, Joel Stefan, deduziu a partir de dados experimentais a lei que relaciona a energia radiante de um corpo negro com a temperatura. Em 1894, Ludwig Boltzmann chegou às mesmas conclusões a partir de estudos baseados na termodinâmica, resultando na Lei de Stefan-Boltzmann (SINISCALCHI, 2009):

$$E = \xi \cdot \theta^4 \tag{3.11}$$

Onde:

θ é a temperatura absoluta [K];

ξ é a constante de Stefan-Boltzmann;

E é a energia radiante [W/m²].

A Figura 3.4 mostra a densidade espectral de comprimentos de onda emitida pelo corpo negro sobre o espectro eletromagnético.

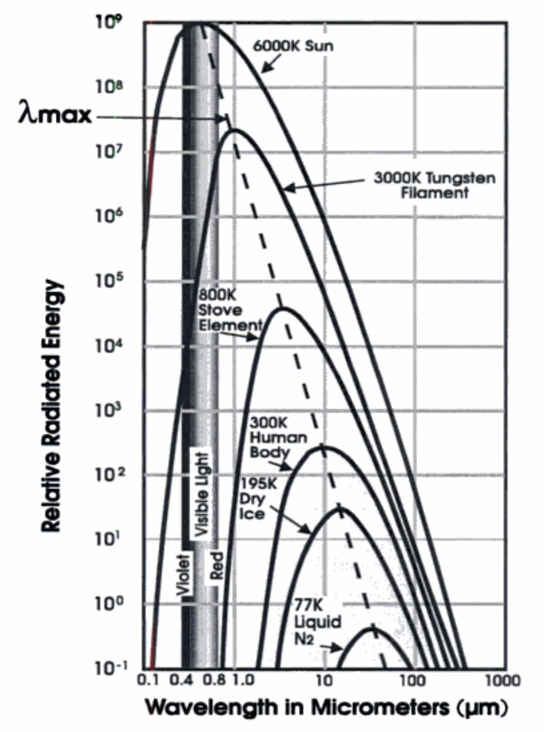


Figura 3.4 – Densidade espectral do corpo negro

Fonte: Kaplan (2007)

Em 1884, W. Wein publicou a *Lei do deslocamento*, que permite calcular o comprimento de onda correspondente à intensidade de radiação máxima para uma dada temperatura.

$$\lambda_{max} \cdot \theta = 2897{,}6 \qquad (3.12)$$

Onde:

λmax é o comprimento de onda correspondente à intensidade máxima de radiação [μm].

Todavia a experiência de Wien se aplicava à baixas temperaturas e pequenos comprimentos de onda. Em 1900, Rayleigh e Jeans desenvolveram uma nova teoria relacionando a radiação do corpo negro com o comprimento de onda. Embora seja utilizado até os dias atuais, seus estudos se aplicavam a uma pequena parte do espectro, ou seja, eram válidos para os grandes comprimentos de onda (SINISCALCHI, 2009).

Planck procurou interpolar os resultados de Wein e Rayleigh-Jeans, como mostra a Figura 3.5 e, com a introdução do conceito do quantum de energia, chegou, em 1900, na equação para a distribuição de radiação do corpo negro.

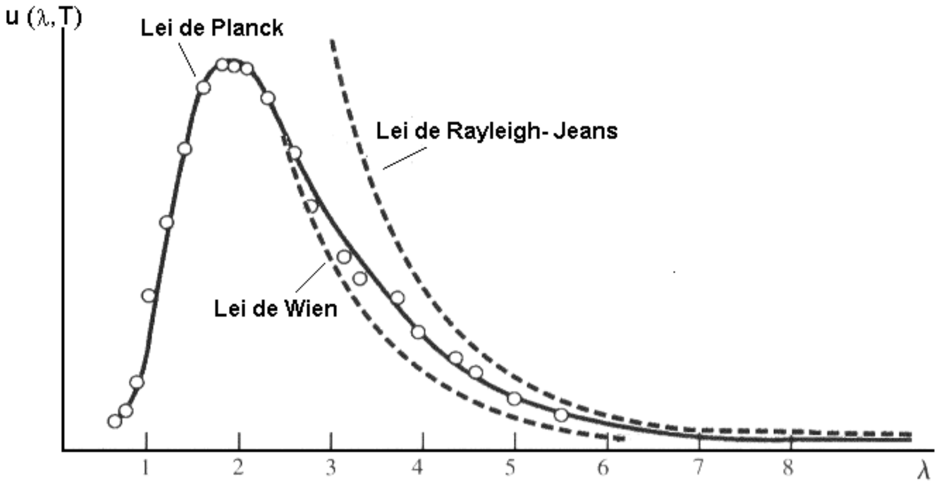


Figura 3.5 – Região do espectro de emissão onde as leis de Wien e Rayleigh concordam com a lei de Planck. Fonte: Mundin (1997).

$$E_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \left(\frac{1}{e^{(c_2)} - 1} \right) \qquad (3.13)$$

Onde:

E_{λ} é a irradiância espectral do corpo negro [$W/m^2 \cdot \mu m$];

c_1 é a constante de radiação = 3,7411 · 10^8 [$W \cdot \mu m^4/m^2$];

c_2 é a constante de radiação = 1,4388 · 10^8 [$\mu m \cdot K$];

λ é o comprimento de onda [μm].

Conforme descrito anteriormente, o corpo negro é elemento de estudo ideal com capacidade total de absorção de energia radiante sobre ele incidido. Os objetos reais não emitem toda a radiação conforme descrito na lei de Planck, ou seja, emitem uma fração que é chamado de emissividade:

$$\varepsilon = \frac{E_{real}}{E_{corpo\,negro}} \tag{3.14}$$

A emissividade é um número adimensional variando de 0 a 1, e não é uma propriedade simples de ser determinada, podendo variar com o comprimento de onda, forma do objeto, temperatura, qualidade da superfície e ângulo de incidência.

Quando a radiação incide sobre uma superfície, parte pode ser transmitida, absorvida ou refletida:

$$E_{trans} + E_{abs} + E_{ref} = E_{incid} \tag{3.15}$$

Esta equação é chamada de lei da conservação de energia. Para a maioria dos corpos sólidos a radiação transmitida é igual a zero, porém, o não conhecimento destes valores, pode inserir erros nas medições.

Para minimizar tais erros, geralmente, usam-se tabelas com materiais conhecidos ou ajustam-se os sensores de radiação através de calibração ou comparação com medições realizadas através de processos de contato.

A seguir será apresentada a metodologia da modelagem empregada, juntamente com as simplificações usadas e as descrições dos cálculos utilizados no desenvolvimento para estimar as perdas no motor.

4. MÉTODO CALORIMÉTRICO

O método calorimétrico consiste em determinar as perdas da máquina calculando o calor absorvido pelos meios refrigerantes, partindo do princípio que a somatória das perdas do motor é transformada em calor. É um método expedito prático e em alguns casos o único aplicável devido às características de operação do sistema.

Primeiramente para se determinar o calor absorvido pelo meio refrigerante é preciso calcular a diferença de temperatura entre a superfície do motor e a temperatura do ar ambiente, que será o ar refrigerante.

Portanto, ao invés da instalação de medidores de temperatura por contato nas entradas e saídas dos trocadores de calor e nas superfícies radiantes, a metodologia apresentada propõe realizar medidas de temperatura à distância. Através da termografia é possível transformar as imagens térmicas, que fornecem as temperaturas de superfície, em taxas de perda de energia, que possibilita determinar as perdas e o rendimento do motor.

Para o cálculo das perdas pelo método calorimétrico, o motor foi instalado dentro de um volume de controle conforme apresentado na Figura 4.1 a seguir; onde foi possível medir as características do ar na entrada e na saída.



Figura 4.1 – Volume de controle do motor

Através da equação fundamental da calorimetria pode-se obter as perdas no motor calculada pela quantidade de calor trocado no motor ao sofrer uma variação na sua temperatura conforme a equação apresentada a seguir.

$$P_{erdas} = \dot{m}_{ar} \cdot C_{ar} \cdot (\theta_{saida} - \theta_{entrada}) \quad (4.1)$$

Onde:

$\dot{m}_{ar}$ é a vazão mássica de ar [kg/s];

c_{ar} é o calor especifico do ar [kJ/kg·K];

θ_{saida} é a temperatura do ar de saída [K];

$\theta_{entrada}$ é a temperatura do ar de entrada [K].

Essas perdas representam o calor dissipado pelo motor por condução, irradiação e convecção.

Devido à pequena contribuição, as parcelas das perdas por condução e radiação foram desprezadas e as perdas por convecção foram caracterizadas em duas: natural e forçada. A convecção natural representa o calor na superfície que flui naturalmente para o meio ambiente, enquanto que a convecção forçada está relacionada com a perda absorvida pelo fluxo de ar empurrado pelo ventilador do motor.

Logo, para calcular essas perdas, foram utilizadas basicamente duas equações principais, juntamente com técnicas de medição de temperatura através da termografia infravermelha e processamento de imagens termográficas.

As imagens termográficas da superfície do motor foram segmentadas em pequenas regiões com as mesmas faixas de temperatura (isotermas), conforme pode ser observado na figura a seguir

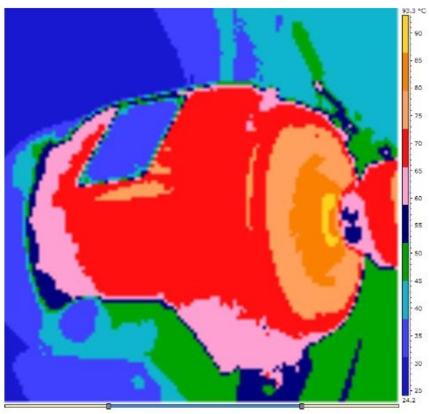


Figura 4.2 – Motor em representação de isotermas

4.1. Perda por convecção

As perdas no motor por convecção ocorrem através do processo natural e forçada. A seguir é apresentado o procedimento para calcular essas perdas.

4.1.1. Equação da perda por convecção natural

As perdas por convecção natural no motor acontecem através do aquecimento da carcaça do motor em contato com o ar.

Através do processo de isotermas (regiões com mesma temperatura), a perda por convecção foi fragmentada em um somatório de áreas com isotermas de 2 graus Celsius de variação buscando obter maior precisão nas medidas.

Para a determinação das perdas por convecção foi utilizada a equação (4.2) descrita abaixo.

$$\mathrm{Pconv} = \mathrm{h} \cdot \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} [\, \mathrm{S_i} \cdot (\theta\mathrm{si} - \theta\mathrm{ar})] \tag{4.2}$$

Onde:

P_{CONV} é a perda por convecção [W];

S é a área da superfície [m^2];

θ_s é a temperatura da superfície [°C];

θ_{ar} é a temperatura do ar [°C];

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m^2°C];

n é o número de faixas de isotermas.

Pela Figura 4.3, observa-se que a convecção na carcaça do motor não acontece de forma natural, pois ocorre a interferência de correntes de ar que saem da tampa defletora causada pelo funcionamento do ventilador.



Figura 4.3 – Passagem de ar através da carcaça

Enquanto IEEE std-112 sugere o valor de 12,4 para o *h* a norma IEC 34-2 considera o valor de 15, na ausência do fluxo do fluido. Quando ocorre a interferência de correntes de ar sobre a superfície em estudo, a norma IEC 34-2 sugere considerar o coeficiente de escoamento do fluido, para superfícies em contato com o ar refrigerante, conforme a equação (4.3) apresentada a seguir:

$$h = 11 + 3 \cdot V \tag{4.3}$$

Onde V é a velocidade de escoamento do fluido (ar) [m/s].

4.1.2. Equação da perda por convecção forçada

Convecção forçada é um tipo de transferência de calor em que o movimento de um fluido é devido a uma força externa. No caso de motores elétricos, o ventilador fixado na extremidade do eixo desloca o ar no sentido axial. As perdas absorvidas da máquina pelos fluidos de refrigeração podem ser determinadas pela seguinte equação:

$$P_{VAZÃO} = Q \cdot \rho \cdot c_{ar} \cdot (\theta_{saida} - \theta_{entrada}) \tag{4.4}$$

Onde:

$P_{VAZÃO}$ são as perdas absorvidas pelo ar [kW];

Q é a vazão do ar refrigerante [m^3/s];

ρ é a massa especifica do ar [kg/m^3] = 1,1614 a 300 K (Incropera, 2003);

c_{ar} é o calor especifico do ar [kJ/kg·K] = 1,007 para 300 K (Incropera, 2003);

θ_{saida} é a temperatura de saída do ar [K];

$\theta_{entrada}$ é a temperatura do ar de entrada, que é igual à temperatura do ar ambiente [K].

As normas IEC-34-2 (1996) e ABNT NBR 5052 (1984) sugerem o cálculo da vazão de ar utilizando a somatória das velocidades do ar com as áreas parciais através dos trocadores de calor, conforme a equação (4.5) a seguir:

$$Q = \sum_{i=1}^{n} V_i \cdot S_i \tag{4.5}$$

Onde:

n é o número total de subdivisão da área em que o ar atravessa;

Q é a vazão do ar refrigerante [m^3/s];

Si são as áreas das seções parciais da tampa [m^2];

Vi é a velocidade nas seções parciais [m/s].

Devido aos valores diferentes de temperatura no motor, estes deverão ser medidos nas seções parciais de entrada e saída da tampa, e em seguida, realizar uma média geral dos valores medidos.

4.2. Transferência de calor por condução e radiação

Quando o motor em análise estiver na etapa de elevação de temperatura, verifica-se o processo de condução de calor de pequena proporção através dos suportes de fixação do motor apoiada na base. Quando a temperatura do motor estabiliza, a base e os suportes do motor estão praticamente na mesma temperatura. Como o estudo está enfatizado na determinação das perdas em regime permanente, este tipo de perda foi desconsiderado.

No caso da radiação, sabe-se que a constante de Stefan-Boltzmann é muito pequena, na ordem de 10^{-8} e, em ensaios realizados neste trabalho, foi calculada as perdas totais por

radiação que resultaram em valores na ordem de 10^{-6} W, sendo assim, o cálculo deste tipo de perda também foi desprezado.

4.3. Medição da temperatura

Para capturar as imagens termográficas foi utilizado o termovisor *InfraCAM* fabricado pela *FLIR System*. A Tabela 4.1 apresenta os dados técnicos da câmera, a Figura 4.4 mostra o termovisor e a Figura 4.5 mostra uma imagem termográfica do motor.

Tabela 4.1 – Dados técnicos da câmera

Termovisor *InfraCAM SD*	
Faixa de medição	-10 a 350 °C
Amplitude espectral	7,5 a 13,0 μm
Tipo de detector	Matriz de plano Focal 120x120 pixel
Precisão	± 2,0 °C ou ± 2% da leitura
Sensibilidade Térmica	0,12 °C
Frequencia de imagens	9 Hz
Display	LCD policromático de 89 mm, cores de 18 bits
Período de funcionamento com bateria	Cerca de 7 horas com utilização normal
Temperatura de funcionamento	-15 até 50 °C
Temperatura de armazenamento	-40 até 70 °C
Umidade de funcionamento e armazenamento	20 a 80% sem condensação
Grau de proteção	IP 54

Fonte: *FLIR System*, 2007



Figura 4.4 – *InfraCAM SD*

Fonte: *FLIR System*, 2007

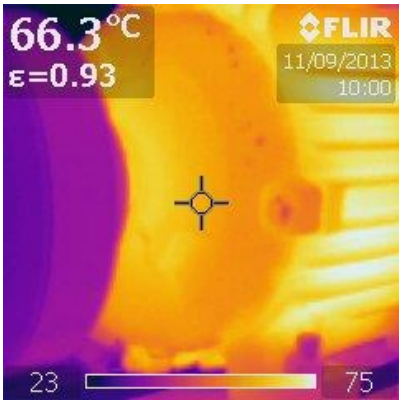


Figura 4.5 – Imagem termográfica do motor

O procedimento para a captura da imagem será de acordo com o manual do usuário da *FLIR Systems* e de acordo com o "Guia de Bolso Testo para Termografia", na qual apresenta as informações e regras a serem seguidas para melhorar a qualidade e precisão das imagens. A seguir serão apresentados algumas técnicas e cuidados para medição por termografia.

4.3.1. Fontes de erro na medição infravermelha

Durante a realização das medições é necessário adotar procedimentos para evitar a obtenção de imagens com erros. Os fatores apresentados a seguir podem distorcer o resultado da medição infravermelha:

- Ajuste incorreto de emissividade.
- Ajuste incorreto da temperatura de radiação refletida (RTC).
- Imagem térmica desfocada. É muito importante focar a imagem no momento da captura, uma vez que o foco não pode ser modificado posteriormente.
- Distância de medição muito longa ou muito curta. Ao medir, é necessário respeitar a distância mínima de foco da câmera termográfica e escolher a menor distância de medição possível.
- Efeito de fontes externas de radiação (ex. luzes, sol, aquecedores, etc.).
- Mudança rápida da temperatura ambiente. Se houver mudanças na temperatura ambiente de frio para quente, há o risco de condensação nas lentes.
- Na medida do possível, utilizar o termovisor com detectores estabilizados de temperatura.
- Interpretação errônea da imagem térmica devido à falta ou desconhecimento do desenho do objeto medido. O tipo e desenho do objeto medido devem ser conhecidos. Utilizar imagens reais (fotos ou desenhos) na medida do possível para interpretar as imagens térmicas.

4.3.2. Determinação da temperatura de radiação refletida

Uma vez que foram evitadas todas as fontes possíveis de interferência que possam afetar a medição, a temperatura da radiação infravermelha refletida será a mesma da temperatura ambiente. Pode-se medir a temperatura ambiente com um termômetro, e com base nisto, obter a RTC do termovisor.

Outro meio de obtenção da temperatura da radiação refletida é através de um radiador Lambert que é um objeto que reflete a radiação incidente com a melhor difusão. Se a equipe de medição não dispor de tal objeto, um pedaço de alumínio amassado e depois desamassado é um substituto apropriado para o radiador Lambert, pois a folha tem elevada refletância e graças à estrutura que foi amassada, provoca reflexão difusa da radiação.

4.3.3. Ajuste da emissividade

Para a determinação da emissividade da região que se pretende medir existem duas maneiras que estão descritas a seguir:

4.3.3.1. Método com a câmera termográfica

Primeiramente deve-se fixar uma fita adesiva de emissividade conhecida no objeto a ser medido. Depois de um curto período de tempo, medir a temperatura da superfície do objeto na área coberta pela fita adesiva usando o termovisor com ajuste de emissividade da fita adesiva (geralmente igual 0,95) que será a temperatura de referência. Posteriormente deve-se ajustar o valor da emissividade até que o termovisor meça a mesma temperatura na área sem a fita em relação a temperatura de referência medida. A emissividade ajustada será a emissividade da superfície do objeto medido.

4.3.3.2. Método usando termômetro de contato

Inicialmente deve-se medir a temperatura da superfície do objeto com o termômetro de contato. Depois será medida a temperatura da superfície do motor com o termovisor com pré-ajuste da emissividade igual a 1. A diferença entre o valor da temperatura medida pelo termômetro de contato e o termovisor será o valor da emissividade. Abaixando gradualmente o ajuste de emissividade, a temperatura medida irá alterar até corresponder ao valor obtido na medição com o termômetro de contato. A emissividade ajustada corresponde é a emissividade da superfície do objeto medido.

A Tabela 4.2 fornece referências para a estimativa da emissividade e podem ser usadas quando não for possível realizar nenhum dos métodos anteriores. Os parâmetros apresentados a seguir podem afetar a emissividade de um objeto.

- Temperatura;
- Ângulos de medição;
- Geometrias (plano, côncavo, convexo, etc);
- Faixas espectrais da medição do pirômetro;
- Transmissividade (como em plásticos de filme fino);
- Qualidades da superfície (polida, rugosa, oxidada, jateada).

Tabela 4.2 – Valores de emissividade de materiais

Material	**Temperatura da superfície [ºC]**	**Emissividade**
Alumínio polido	200 – 600	0,04 - 0,06
Alumínio altamente oxidado	90 – 500	0,20 – 0,33
Placa de amianto	40	0,96
Ferro fundido rugoso altamente oxidado	40 - 260	0,95
Ferro fundido polido	400 - 500	0,14 – 0,38
Cobre polido	40 - 260	0,04 – 0,05
Chapa de ferro galvanizada polido	40	0,24
Chapa de ferro galvanizado oxidado	40 - 260	0,28
Tinta, óleo	100	0,92 – 0,96
Papel	40	0,91
Borracha	20	0,92
Aço galvanizado	250 – 650	0,27 – 0,31
Aço rugoso altamente oxidado	20	0,81
Aço com revestimento de níquel	20	0,11
Aço polido	-20 - 150	0,08 – 0,14
Latão oxidado	200 – 500	0,60
Água	0 - 100	0,96

Fonte: Adaptado de Siegel e Howell, 1972

Nos ensaios dos motores em laboratório foi realizado o ajuste da temperatura da radiação refletida pelo método do radiador Lambert com papel alumínio amassado. Já no ajuste da emissividade, foi realizado pelo método da câmera termográfica com fita adesiva. Também foram seguidas, na medida do possível, as técnicas de termografia descritas acima para melhorar a precisão das imagens.

Caso exista a contribuição de outras fontes de calor, como por exemplo, um forno próximo ao motor, será necessário ajustar a temperatura da radiação refletida pelo método do radiador de Lambert para cada parte da superfície do motor.

A Figura 4.6 apresenta os parâmetros de ajuste da câmera utilizados durante a realização das imagens, que basicamente são: a emissividade, distância entre o objeto e a câmera e a temperatura refletida.

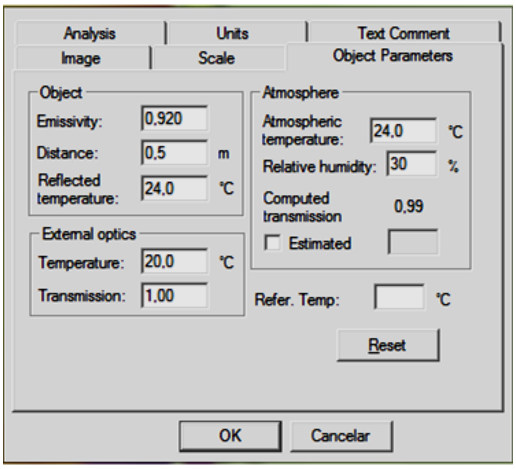


Figura 4.6 – Configuração dos parâmetros da câmera

4.3.4. Medição da velocidade e temperatura do ar

Para a realização da medição da velocidade e temperatura do ar foi utilizado um anemômetro térmico do Centro de Excelência em Eficiência Energética - Excen, no qual possui uma sonda telescópica de velocidade (sonda de fio quente) com sensor de temperatura, possibilitando assim medir a velocidade e a temperatura do ar que escoa na superfície do motor. A Figura 4.7 mostra o equipamento e a Tabela 4.3 apresenta os dados técnicos do instrumento.



Figura 4.7 – Anemômetro térmico

Fonte: Testo (2010)

Tabela 4.3 – Dados técnicos do anemômetro térmico

Anemômetro Térmico Testo 425		
	Velocidade	Temperatura
Amplitude espectral	0 até 20 m/s	- 20 até 70°C
Resolução	0,01 m/s	0,1 °C
Exatidão	± 0,03 m/s	± 0,5 °C (0 até 60,0 °C)
		± 0,7 °C (resto da gama)
Intervalo de medição	2 segundos	
Grau de proteção	IP65	
Temperatura de funcionamento	- 20 até 50°C	
Temperatura de armazenamento	-40 até 85°C	
Peso	285 g	

Fonte: Testo (2010)

5. ANÁLISE DE ERROS

Um dos princípios básicos da física diz: "Não se pode medir uma grandeza física com precisão absoluta", ou seja, "qualquer medição, por mais bem feita que seja, é sempre aproximada" (ALBERTAZZI, 2010). De acordo com o princípio descrito acima, o valor medido ou o resultado deve ser expresso com uma *incerteza da medida*, utilizando uma representação em uma linguagem universal. Por isso, deve-se necessariamente associar um *erro* ou *desvio* ao valor de qualquer medida.

A incerteza padrão é uma medida da intensidade do erro aleatória do sistema de medição. Corresponde ao valor do desvio padrão do erro de medição. Uma estimativa do desvio padrão é obtida pelo desvio padrão da amostra, calculado a partir de um número finito de medições repetidas do mesmo mensurando dado por:

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{\frac{(I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \cdot I_i \qquad (5.1)$$

onde:

σ é o desvio padrão da amostra;

I_i é a i-ésima medição;

$\bar{I}$ é a média das "n" medidas;

n é o número de medições repetidas efetuadas.

Quando calculada a partir de um conjunto de medições repetidas, a *incerteza padrão* corresponde ao desvio padrão da amostra. Deve ser associado à incerteza padrão o número de *graus de liberdade* com que foi estimada. O número de graus de liberdade reflete o grau de segurança com que a estimativa do desvio padrão é conhecida e corresponde ao número de medições efetuadas menos um. No caso especial em que o desvio padrão é conhecido exatamente, o número de graus de liberdade é considerado infinito.

$$v = n - 1 \qquad (5.2)$$

Onde:

v é número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão.

5.1. Estimativa da repetitividade

Denomina-se *repetitividade* como sendo a metade do valor da largura da faixa simétrica em torno do zero, dentro da qual, para uma dada probabilidade, o erro aleatório é esperado. Por exemplo, conforme apresentada na Figura 5.1, se a probabilidade de 95,45% é adotada, a repetitividade corresponde a 2σ.

A área sob a curva normal contida dentro da faixa limitada por μ - 2σ e μ + 2σ pode ser calculada e corresponde a cerca de 95,45% da área total. Isso quer dizer que existe uma probabilidade de 95,45% do erro aleatório estar contido dentro dos limites dados por ± 2σ.

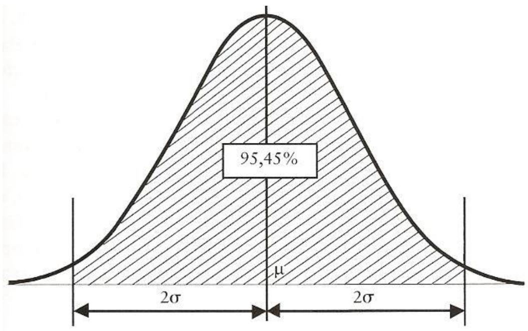


Figura 5.1 – Estimativa da repetitividade a partir do desvio padrão

Fonte: Altertazzi (2010)

Assim, para o cálculo da repetitividade, foi desenvolvida a distribuição *t de Student,* onde quanto mais dados forem usados para estimar o desvio padrão, melhor será a confiabilidade da estimativa realizada. Entretanto, quando poucos dados forem utilizados na análise, irá resultar numa estimativa ruim ou incerta. Para compensar a incerteza de uma estimativa pobre do desvio padrão, a repetitividade deve ser calculada multiplicando-se a estimativa do desvio-padrão por um número maior que 2, incorporando assim um “coeficiente de segurança” devidamente calculado. Esse número é o fator *t de Student.* Assim, a repetitividade é calculada por:

$$Re = t \cdot u \qquad (5.3)$$

Onde:

Re é a repetivividade;

t é o coeficiente *t de Student* para n-1 graus de liberdade;

u é a incerteza-padrão obtida a partir da amostra.

5.2. Caracterização da incerteza-padrão de cada fonte de incerteza

A contribuição aleatória de cada fonte de incerteza deve ser individualmente quantificada pela sua incerteza-padrão. Dois procedimentos são normalmente utilizados para quantificação da incerteza-padrão associada a uma fonte de incerteza: procedimentos estatísticos (Tipo A) e procedimentos sistemáticos (Tipo B).

5.2.1. Procedimentos estatísticos (Tipo A)

A incerteza tipo A é padrão e está associada a uma ou mais fontes de incerteza, é estimada a partir de medições repetidas do mesmo mensurando. Trata-se de um procedimento estatístico.

$$u(I) = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{\frac{(I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \tag{5.4}$$

Onde:

$u(I)$ é a incerteza-padrão das indicações calculada a partir de "n" medições repetidas;

I_i é a i-ésima medição;

$\bar{I}$ é a média das "n" medições;

n é o número de medições repetidas efetuadas.

Quando o mensurando é invariável e o seu valor é calculado a partir da média de "n" medições repetidas, a incerteza-padrão da média é utilizada. É calculada da seguinte forma:

$$u(\bar{I}) = \frac{u(I)}{\sqrt{n}} \tag{5.5}$$

Onde:

$u(\bar{I})$ é a incerteza-padrão da média de "n" indicações.

O número de graus de liberdade envolvidos na determinação da incerteza-padrão é sempre o número de dados usados para calcular o desvio padrão menos um.

5.2.2. Procedimentos sistemáticos (Tipo B)

Nem sempre é prático, ou mesmo possível, utilizar procedimentos estatísticos para estimar a incerteza-padrão de uma determinada fonte de incerteza. Informações conhecidas a priori sobre o comportamento aleatório da fonte de incerteza ou deduzidas por observação das suas características são consideradas.

Informações extraídas das especificações técnicas do sistema de medição, informações históricas obtidas de medições anteriores, de certificados de calibração e mesmo estimadas baseadas na experiência de especialistas, são exemplos de conhecimento a priori que podem ser levados em conta.

Erros tipo B de resolução são levados em consideração, onde este representa metade da menor divisão levando em consideração uma distribuição retangular.

5.3. Incerteza combinada

Os efeitos da ação combinada das várias fontes de incerteza devem ser quantificados pela incerteza combinada, que é representado pelo desvio-padrão resultante da ação combinada das componentes aleatórias de todas as fontes de incerteza que afetam um processo de medição.

Para estimar a incerteza combinada da ação simultânea de "n" fontes de incerteza, todas estatisticamente independentes, deve ser usada conforme a seguinte equação:

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + \cdots + u_n^2 \tag{5.6}$$

Onde:

u_c é a incerteza combinada;

u_i é a incerteza-padrão da i-ésima fonte de incerteza.

5.4. Número de graus de liberdade efetivos

Cada uma das incertezas padrão, separadamente estimadas para cada fonte de incerteza, tem-se um número de graus de liberdade associado. Quando a incerteza combinada é calculada, o número de graus de liberdade equivalente da combinação deve ser calculado pela equação de Welch-Satterthwaite:

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \cdots + \frac{u_n^4}{v_n} \tag{5.7}$$

Onde:

v_{ef} é o número de graus de liberdade efetivos;

u_c^4 é a incerteza combinada;

u_i é a incerteza-padrão da i-ésima fonte de incerteza;

v_i é o numero de graus de liberdade da i-ésima fonte de incerteza.

5.5. Incerteza expandida

A incerteza combinada corresponde ao desvio-padrão da ação conjunta de todas as fontes de incerteza. Para obtenção da faixa de valores em que, com cerca de 95% de probabilidade, espera-se encontrar o erro aleatório do processo de medição, é necessário multiplicar a incerteza combinada pelo respectivo coeficiente *t de Student*. Determina-se, assim, uma quantidade equivalente à repetitividade da ação combinada de todas as fontes de incerteza.

$$U_{95\%} = t \cdot u_c \tag{5.8}$$

Onde:

$U_{95\%}$ é a incerteza expandida do processo de medição;

t é o coeficiente *t de Student* correspondente ao número de graus de liberdade efetivos e com 95% de probabilidade;

u_c é a incerteza combinada.

Na equação da repetitividade, a incerteza-padrão é multiplicada pelo coeficiente *t de Student*. A equação acima é equivalente à equação da repetitividade quando a ação combinada da componente aleatória de várias fontes de incerteza é considerada.

5.6. Propagação de erros

Na maioria dos experimentos, a medição de uma grandeza *R* de interesse é realizada de maneira indireta, sendo esta grandeza obtida a partir de medidas de *n* grandezas primárias

$\{a_1, a_2, a_2, ..., a_n\}$. O cálculo de R é obtido a partir de uma função conhecida das grandezas primárias. Estas grandezas são também denominadas *grandezas de entrada*, enquanto a grandeza R é denominada *grandeza de saída*. Os valores das grandezas de entrada provêm, todos ou em parte, de medições diretas.

$$R = R(a_1, a_2, a_3, ..., a_n) \tag{5.9}$$

Utilizando aproximações e um grande número de medidas (amostras), pode-se admitir que o valor médio seja considerado o valor verdadeiro. Da mesma forma, a incerteza padrão pode ser considerada como o desvio padrão verdadeiro.

Realizando um desenvolvimento matemático apropriado, tem-se a expressão para o cálculo da incerteza padrão da grandeza de saída.

$$\sigma_{\bar{R}} = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial R}{\partial a_1}\right)^2 \cdot \left(\sigma_{\bar{A}_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial a_2}\right)^2 \cdot \left(\sigma_{\bar{A}_2}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial a_n}\right)^2 \cdot \left(\sigma_{\bar{A}_n}\right)^2\right]} \tag{5.10}$$

Esta expressão para a incerteza padrão da grandeza de saída, também chamada de *incerteza padrão combinada*, é utilizada quando as grandezas de entrada $\{a_1, a_2, ..., a_n\}$ são medidas repetidas vezes, gerando valores médios a_k e desvios padrão das médias $\sigma_{\bar{A}k}$.

Na Tabela 5.1 são apresentadas as expressões para o cálculo da incerteza padrão em grandezas combinadas, utilizando a propagação de erro para diversas relações funcionais.

Tabela 5.1 – Expressões para cálculos das incertezas combinadas de algumas grandezas *R*

Relação funcional	Erro propagado
$\bar{R} = R(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \ldots, \bar{a}_n)$	$\sigma_{\bar{R}} = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial a_1}\right)^2 \sigma_{\bar{a}_1}{}^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial a_2}\right)^2 \sigma_{\bar{a}_2}{}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial a_n}\right)^2 \sigma_{\bar{a}_n}{}^2}$
$\bar{R} = \bar{a} \pm \bar{b}$	$(\sigma_{\bar{R}})^2 = (\sigma_{\bar{a}})^2 + (\sigma_{\bar{b}})^2$
$\bar{R} = \bar{a}.\bar{b}$ ou $\bar{R} = \frac{\bar{a}}{\bar{b}}$	$(\frac{\sigma_{\bar{R}}}{\bar{R}})^2 = (\frac{\sigma_{\bar{a}}}{\bar{a}})^2 + (\frac{\sigma_{\bar{b}}}{\bar{b}})^2$
$\bar{R} = \bar{a}^r$	$\frac{\sigma_{\bar{R}}}{\bar{R}} = r\frac{\sigma_{\bar{a}}}{\bar{a}}$
$\bar{R} = \ln \bar{a}$	$\sigma_{\bar{R}} = \frac{\sigma_{\bar{a}}}{\bar{a}}$
$\bar{R} = e^{\bar{a}}$	$\frac{\sigma_{\bar{R}}}{\bar{R}} = \sigma_{\bar{a}}$

Fonte: Toginho (2009)

6. APLICAÇÕES DA METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta foi aplicada a motores de indução trifásicos com potências de 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 e 7,5 cv, onde foram realizados no laboratório os ensaios de rotor livre e com carga a 50, 75 e 100% do motor.

As imagens obtidas com as medições feitas pela câmera termográficas foram processadas onde foram obtidas as perdas e o rendimento do motor que foram comparados com os valores nos ensaios normatizados.

Foram realizados ensaios nos motores estudados neste trabalho no LEPCH (Laboratório Eletro-Mecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas) no campus da UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá). A bancada possui uma máquina de corrente contínua, transdutor de torque, sensor de rotação, resistência líquida e sistema de aquisição de dados. A Figura 6.1 apresenta a bancada utilizada.



Figura 6.1 – Motor acoplado à bancada de testes

Para a realização dos ensaios foram utilizadas as normas NBR 5383-1, IEC 60034-2 e IEEE 112, onde foram ensaiados os seguintes motores:

Tabela 6.1 – Dados de placa do motor convencional de 1 cv

Modelo	B80 A4	Fabricante	Metal corte
Classe de isolamento	B	Potência	1 cv
Frequência	60 Hz	Corrente	2,95 A
Rotação	1730 rpm	Tensão	220 V
Fator de Serviço	1,15	Rendimento	78,0%
Grau de proteção	IP55	Fator de potência	0,84
Categoria de conjugado	N		

Tabela 6.2 – Dados de placa do motor alto rendimento de 1 cv

Modelo	ARB80A4	Fabricante	Metal corte
Classe de isolamento	F	Potência	1 cv
Frequência	60 Hz	Corrente	3,1 A
Rotação	1730 rpm	Tensão	220 V
Fator de Serviço	1,15	Rendimento	80,5%
Grau de proteção	IP55	Fator de potência	0,78
Categoria de conjugado	N	Ip/In	6,8

Tabela 6.3 – Dados de placa do motor de 2 cv

Modelo	B90 54	Fabricante	Metal corte
Classe de isolamento	B	Potência	2 cv
Frequência	60 Hz	Corrente	5,9 A
Rotação	1730 rpm	Tensão	220 V
Fator de Serviço	1,15	Rendimento	81,5%
Grau de proteção	IP55	Fator de potência	0,80
Categoria de conjugado	N	Ip/In	6,9

Tabela 6.4 – Dados de placa do motor alto rendimento WEG de 3 cv

Modelo	90 L	Fabricante	Metal WEG
Classe de isolamento	B	Potência	3 cv
Frequência	60 Hz	Corrente	8,59 A
Rotação	1710 rpm	Tensão	220 V
Categoria de conjugado	N	Rendimento	84,8%
Grau de proteção	IP55	Fator de potência	0,84

Tabela 6.5 – Dados de placa do motor de alto rendimento Metal Corte de 5 cv

Modelo	ARB100L4	Fabricante	Metal corte
Classe de isolamento	F	Potência	5 cv
Frequência	60 Hz	Corrente	13,4 A
Rotação	1730 rpm	Tensão	220 V
Fator de Serviço	1,15	Rendimento	86,5%
Grau de proteção	IP55	Fator de potência	0,82
Categoria de conjugado	N	Ip/In	7,2

Tabela 6.6 – Dados de placa do motor convencional Metal Corte de 5 cv

Modelo	B100 L4	Fabricante	Metal corte
Classe de isolamento	B	Potência	5 cv
Frequência	60 Hz	Corrente	14 A
Rotação	1730 rpm	Tensão	220 V
Fator de Serviço	1,15	Rendimento	85,0%
Grau de proteção	IP55	Fator de potência	0,81
Categoria de conjugado	N	Ip/In	6,9

Tabela 6.7 – Dados de placa do motor WEG de 7,5 cv

Modelo	112 M	Fabricante	WEG
Classe de isolamento	B	Potência	7,5 cv
Frequência	60 Hz	Corrente	22 A
Rotação	1720 rpm	Tensão	220 V
Fator de Serviço	1,15	Ip/In	7,7

Tabela 6.8 – Dados de placa do motor Eberle de 7,5 cv

Modelo	B112 M4	Fabricante	Eberle
Classe de isolamento	B	Potência	7,5 cv
Frequência	60 Hz	Corrente	21 A
Rotação	1735 rpm	Tensão	220 V
Fator de Serviço	1,10	Rendimento	89,5%
Grau de proteção	IP55	Fator de potência	0,81
Categoria de conjugado	H	Ip/In	7,8

6.1. Separação de perdas

Para o cálculo de separação de perdas no motor, a metodologia baseou-se principalmente no método B para determinação do rendimento da norma IEEE 112-B e descrita anteriormente no item 2.4. Neste método a determinação das perdas é obtida subtraindo-se a potência elétrica da mecânica.

$$\text{Perdas} = P_{el} - P_{mec} \tag{6.1}$$

Onde:

P_{el} é a potência elétrica

P_{mec} é a potência mecânica

A potência elétrica é obtida tomando-se as correntes e as tensões de fase que alimentam o motor conforme apresentado na Figura 6.2. Através do software de aquisição de dados instalado na bancada é calculado o valor da potência elétrica tomando valores de tensão e corrente de fase por ciclo.



Figura 6.2 – Sistema de aquisição de dados da bancada

A bancada possui um dinamômetro que consiste em uma máquina de corrente contínua, de carcaça livre, atuando como gerador. Ao ligar este gerador a uma determinada carga elétrica, no caso do ensaio foi utilizado como carga uma resistência líquida (Figura 6.3), obtém-se um conjugado resistente do motor, o qual é medido utilizando-se um transdutor de torque instalado entre o motor e o dinamômetro conforme apresentado na Figura 6.4.



Figura 6.3 – Resistência líquida



Figura 6.4 – Bancada com o transdutor de torque

Esse sistema, além de permitir a leitura direta do conjugado estabelecido, permite também a leitura da velocidade de rotação no eixo do motor através do medidor eletrônico de torque apresentado na Figura 6.5, e consequentemente, o cálculo da potência mecânica fornecida no eixo do mesmo.



Figura 6.5 – Medidor eletrônico de torque

A potência mecânica é calculada pela seguinte equação:

$$P_{mec} = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot M \cdot n \tag{6.2}$$

Onde:

M é o torque [N·m];

n é a rotação [rpm].

A perda total é obtida pelo somatório das perdas Joule do estator e rotor corrigidas para a temperatura especificada para a correção da resistência, da perda no núcleo, da perda por atrito e ventilação e da perda por dispersão.

A resistência das três fases é medida e corrigida para temperatura de 75 ºC pela seguinte fórmula:

$$R_s = R_t \cdot \frac{t_s + k}{t_t + k} \tag{6.3}$$

Com a realização do ensaio de rotor livre onde o motor gira a tensão e frequência nominais sem carga acoplada, tem-se a leitura da potência de entrada que é o total das perdas no motor em vazio, que se dividem em perda Joule a vazio, núcleo, atrito e ventilação.

A separação dessas perdas é realizada plotando-se o gráfico de potência versus tensão elevada ao quadrado, a tensão pode ser dividida por uma constante para uma melhor visualização como na Figura 6.6.

Ao se extrapolar o gráfico para se obter a intersecção da reta com o eixo y se obtém as perdas por atrito e ventilação. Subtraindo-se a perda Joule e a perda por atrito e ventilação da potência lida se obtém a perda no núcleo.

$$P_{HF} = P_o - P_{AV} - P_{J1vazio} \tag{6.4}$$

Onde:

P_{HF} são as perdas por histerese e Foucault;

P_o é a potência de entrada a vazio;

P_{AV} são as perdas por atrito e ventilação;

$P_{J1vazio}$ é a perda Joule no rotor a vazio

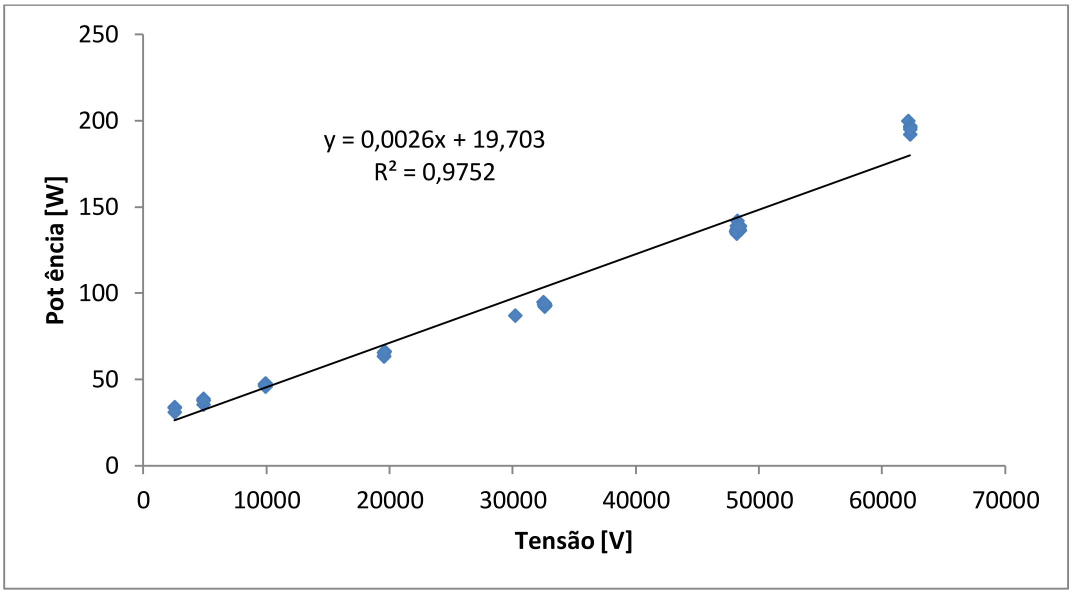


Figura 6.6 – Perdas por atrito e ventilação

Em seguida acopla-se o motor a um gerador para realização do ensaio de variação de carga. Mede-se a potência de entrada, a corrente de linha, a tensão aplicada e a velocidade. Essas medidas são realizadas para os pontos de 50, 75 e 100% de carga do motor.

Então se calcula a perda Joule no estator pela equação:

$$P_{j1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \tag{6.5}$$

Onde:

P_{J1} é a perda Joule no estator;

I_1 é a corrente de linha;

R_1 é a resistência de fase corrigida.

E em seguida as perdas $R_2 \cdot I_2^2$ no rotor da seguinte forma:

$$P_{J2} = (P_{el} - P_{J1} - P_{HF}) \cdot s \tag{6.6}$$

Onde:

P_{J2} é a perda Joule no rotor;

s é o escorregamento corrigido.

O escorregamento é corrigido utilizando a fórmula:

$$s_s = s_t \cdot \frac{t_s + k}{t_t + k} \tag{6.7}$$

Onde:

s_s é o escorregamento corrigido para uma temperatura especificada, t_s;

s_t é o escorregamento obtido no ensaio, à temperatura t_t.

Finalmente as perdas por dispersão são calculadas pela seguinte equação:

$$P_{Disp} = P_{el} - P_{mec} - \delta \tag{6.8}$$

Onde:

P_{Disp} é a perda por dispersão;

δé a soma das perdas Joule no estator, perdas Joule no rotor, perdas no ferro, e perdas por atrito e ventilação.

6.2. Método calorimétrico

Nesta metodologia foi utilizada para o cálculo da condução de calor, a equação da taxa de transferência conhecida como lei de Fourier e apresentada a seguir.

$$Q_x = -\lambda \cdot S \cdot \frac{d\theta}{dx} \tag{6.9}$$

Onde:

Q_x é a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular a direção de transferência [W/m^2];

$\frac{d\theta}{dx}$ é o gradiente de temperatura;

S é a área perpendicular à direção do fluxo [m^2];

k é a condutividade térmica [W/m K].

Na metodologia proposta, a perda por condução de calor que ocorre na base do motor será desprezada, pois ela é pequena quando comparada com as perdas por convecção natural e forçada.

A transferência de calor por radiação entre a superfície do motor e as superfícies circundantes é dada pela lei de Stefan-Boltzmann descrita a seguir.

$$Q_{rad} = S \cdot \xi \cdot \varepsilon \cdot (\theta_1^4 - \theta_2^4) \quad (6.10)$$

onde:

ξ é a constante de Stefan-Boltzmann = $5{,}6669 \cdot 10^{-8} [\frac{W}{m^2 K^4}]$;

ε é a emissividade;

θ_2 é a temperatura refletida [K];

S é a área pela qual ocorre a transferência de calor, medida perpendicularmente à direção do fluxo em calor [m^2];

θ_1 é a temperatura da superfície do motor [K].

A perda por radiação no motor também será desprezada, pois devido à constante de Stefan-Boltzmann, o valor desta perda é pequena.

As perdas por convecção no motor é o processo de transferência de calor devido ao movimento de fluido que pode ser natural ou forçado. O procedimento de cálculo está apresentado no item 6.2.3.

6.2.1. Análise das imagens termográficas

Esta análise consiste na utilização do processamento digital, que se baseia no princípio da integração numérica de toda a superfície. Assim a proposta é de segmentar a superfície do motor em pequenas regiões com as mesmas faixas de temperatura (isotermas), conforme pode ser ilustrado nas figuras a seguir.

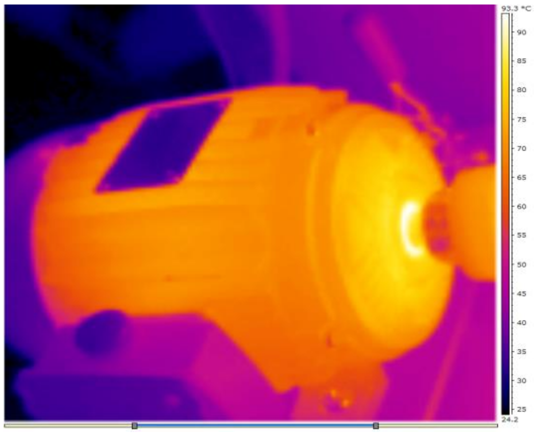


Figura 6.7 – Motor aquecido com a temperatura em regime permanente

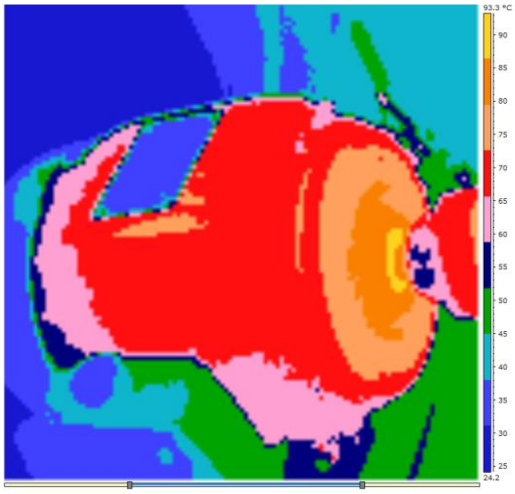


Figura 6.8 – Motor em representação de isotermas através do software *QuickReport*

Para realizar a análise das imagens infravermelhas de cada parte do motor é preciso transformar a imagem em uma matriz de pixel, onde cada pixel possui sua respectiva temperatura, posteriormente, separar os pixels de uma mesma faixa de temperatura, por exemplo, de 30 a 32°C, e calcular a área correspondente a essa isoterma. Este procedimento deverá ser realizado para todas as partes do motor para obtenção das perdas por convecção.

6.2.2. Matriz de pixel

O programa *ThermaCAM Reseacher Pro 2.10* é um programa da *FLIR Systems* onde, é possível selecionar de maneira desejada, a imagem infravermelha com a função "*polygon*" e transformar em uma matriz na qual cada ponto da matriz representa um pixel e nela está associada sua respectiva temperatura. As figuras a seguir apresentam o processo de seleção da imagem e a obtenção da matriz de pixels.

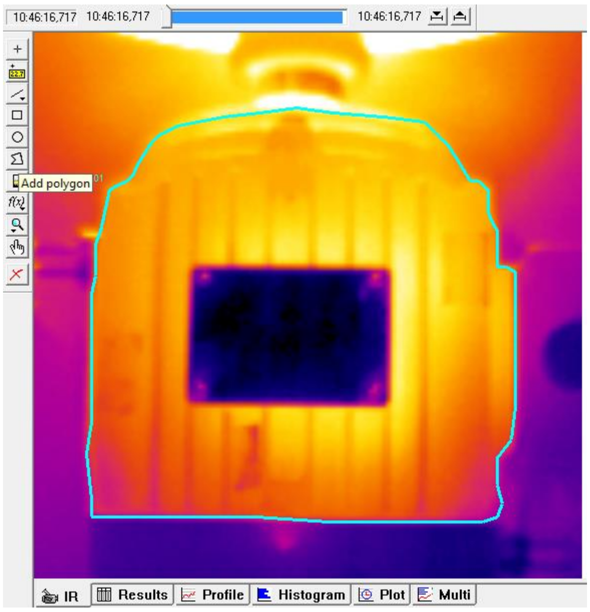
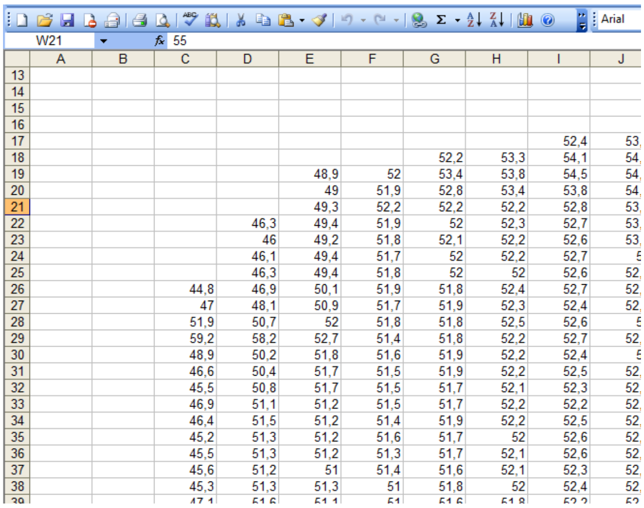


Figura 6.9 – Seleção da área desejada com a função “polygon”


W21 fx 55

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
13										
14										
15										
16										
17									52,4	53,
18							52,2	53,3	54,1	54,
19					48,9	52	53,4	53,8	54,5	54,
20					49	51,9	52,8	53,4	53,8	54,
21					49,3	52,2	52,2	52,2	52,8	53,
22				46,3	49,4	51,9	52	52,3	52,7	53,
23				46	49,2	51,8	52,1	52,2	52,6	53,
24				46,1	49,4	51,7	52	52,2	52,7	5
25				46,3	49,4	51,8	52	52	52,6	52,
26			44,8	46,9	50,1	51,9	51,8	52,4	52,7	52,
27			47	48,1	50,9	51,7	51,9	52,3	52,4	52,
28			51,9	50,7	52	51,8	51,8	52,5	52,6	5
29			59,2	58,2	52,7	51,4	51,8	52,2	52,7	52,
30			48,9	50,2	51,8	51,6	51,9	52,2	52,4	5
31			46,6	50,4	51,7	51,5	51,9	52,2	52,5	52,
32			45,5	50,8	51,7	51,5	51,7	52,1	52,3	52,
33			46,9	51,1	51,2	51,5	51,7	52,2	52,2	52,
34			46,4	51,5	51,2	51,4	51,9	52,2	52,5	52,
35			45,2	51,3	51,2	51,6	51,7	52	52,6	52,
36			45,5	51,3	51,2	51,3	51,7	52,1	52,6	52,
37			45,6	51,2	51	51,4	51,6	52,1	52,3	52,
38			45,3	51,3	51,3	51	51,8	52	52,4	52,

Figura 6.10 – Matriz com as temperaturas dos pixels de parte da imagem selecionada

O próximo procedimento será calcular a área correspondente a cada parte selecionada do motor. Para isso, no site dos fabricantes de motores são disponibilizados desenhos de vários tipos de motores em 2D/3D nos formatos *DXF*, *IGES*, *SAT (ACIS)*, *STEP e XT (Parasolid)*. Utilizando um software apropriado, como por exemplo, *AutoCAD Inventor*, é foi possível visualizar o motor em 3D conforme apresentado na Figura 6.11:

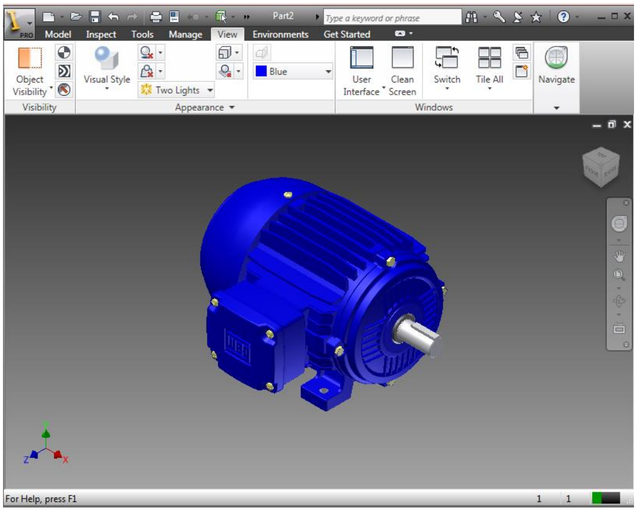


Figura 6.11 – Motor em 3D no software *AutoCAD Inventor*

Utilizando a ferramenta do software é possível calcular o valor da área de qualquer parte do motor conforme mostrado na Figura 6.12.

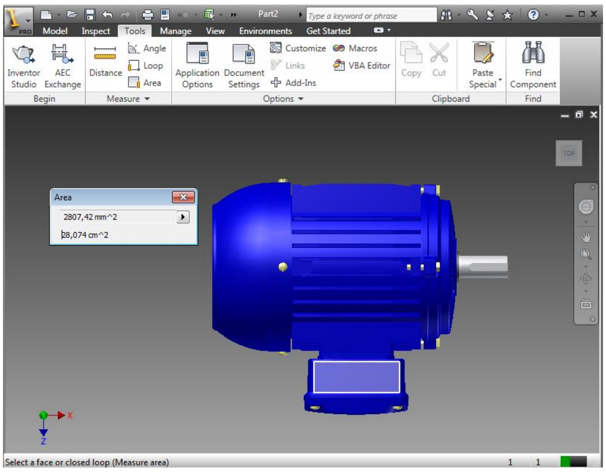


Figura 6.12 – Cálculo da área selecionada do motor

Desta maneira é possível calcular a área de cada parte do motor e associar essa área com a imagem infravermelha. Logo, ao saber o valor da área e dividir pelo número de pixel da matriz, onde ambos representam a mesma parte do motor, é possível calcular o valor de área correspondente a cada pixel com bastante precisão.

6.2.3. Cálculo das perdas por convecção

Para o cálculo das perdas por convecção natural o motor foi dividido em partes onde foram efetuadas imagens da parte superior, lateral direita, lateral esquerda, frontal direita e frontal esquerda.

As figuras apresentadas a seguir (Figura 6.13e Figura 6.14), apresentam as imagens da tampa traseira direita e esquerda do motor e a Figura 6.15 apresenta a matriz de temperatura da lateral e tampa traseira.

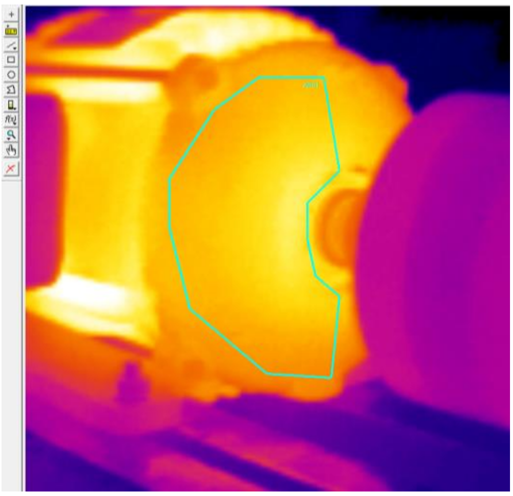


Figura 6.13 – Imagem da tampa traseira lado direito

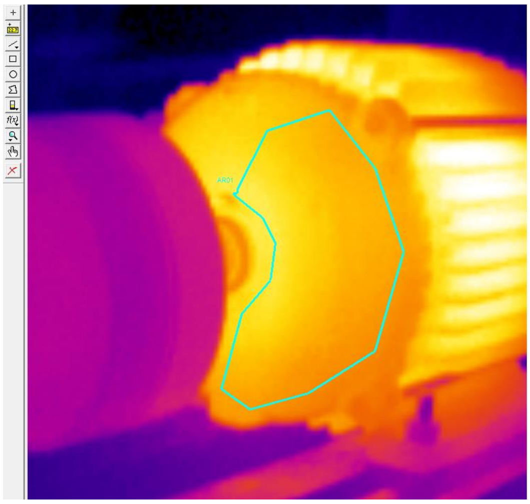


Figura 6.14 – Imagem da tampa traseira lado esquerdo

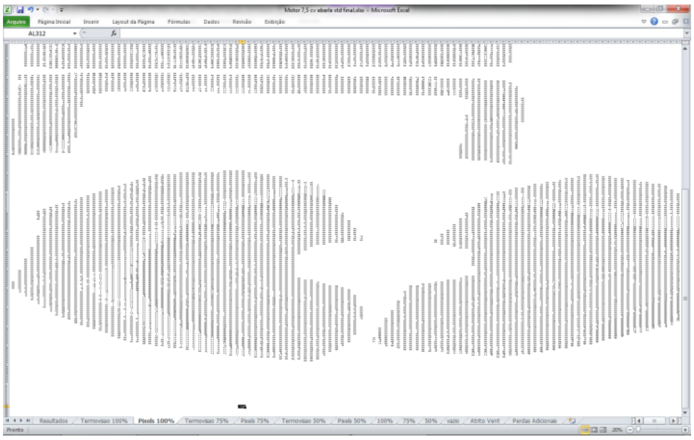


Figura 6.15 – Matriz de temperatura da lateral direita e tampa traseira do motor

Na convecção natural, o movimento do fluido é inteiramente devido às variações de densidade do fluido. Nos motores elétricos, as aletas são utilizadas para aumentar a superfície de convecção. A taxa de transferência de calor pode ser expressa pela equação apresentada a seguir:

$$P_{conv} = h \cdot (\theta_s - \theta_{ar}) \cdot S \qquad (6.11)$$

Onde:

h é o coeficiente de convecção natural;

θ_s é a temperatura da superfície;

θ_{ar} é a temperatura do ar;

S é a área da carcaça do motor.

A Tabela 6.9 a seguir apresenta os valores das áreas superficiais de alguns motores com potências de 1 a 10 cv obtidas através dos desenhos disponibilizados no site dos fabricantes de motores.

Tabela 6.9 – Área da superfície dos motores

Fabricante	Potência [cv]	Modelo carcaça	Superior [m²]	Lateral Direita [m²]	Lateral Esquerda [m²]	Tampa Dianteira [m²]	Inferior [m²]	Área Total [m²]
Voges	1,0	80A	0,038216	0,038950	0,026733	0,024050	0,023429	0,151377
Voges	2,0	90S	0,040919	0,041889	0,045231	0,027023	0,031757	0,186820
Voges	3,0	90 L	0,052200	0,044986	0,051883	0,035429	0,054857	0,239354
Voges	5,0	100L	0,070968	0,073046	0,055728	0,037316	0,059575	0,296633
Voges	7,5	112M	0,092158	0,090792	0,061577	0,044075	0,060008	0,348611
Voges	10,0	132S	0,130445	0,093888	0,127295	0,069881	0,146598	0,568107
WEG	1,0	80A	0,038515	0,039653	0,041371	0,018169	0,033629	0,171336
WEG	2,0	90S	0,047459	0,042909	0,046089	0,021351	0,042746	0,200553
WEG	3,0	90L	0,049621	0,051641	0,046736	0,023083	0,057166	0,228247
WEG	5,0	100L	0,076691	0,061041	0,061445	0,028633	0,068071	0,295880
WEG	7,5	112M	0,080025	0,082181	0,074486	0,046762	0,092832	0,376286
WEG	10,0	132S	0,115068	0,108611	0,109271	0,055525	0,137102	0,525577

Fonte: Site de fabricante de motores Voges e WEG

Através do processo de isotermas (regiões com mesma temperatura). A equação da perda por convecção foi fragmentada em um somatório de áreas de isotermas com 2 ºC de passo para gerar maior precisão.

$$P_{conv} = h \cdot \sum_{1=i}^{n} [\ S_i \cdot (\theta s_i - \theta ar)] \qquad (6.12)$$

Onde:

n é o número de faixas de isotermas;

S_i é a área corresponde a cada isoterma;

θs_i é a temperatura média de cada isoterma.

A equação anterior pode ser escrita da seguinte maneira:

$$P_{conv} = h \cdot \sum_{1=i}^{n} [\, S_i \cdot \Delta\theta] \tag{6.13}$$

Onde Δθ é a diferença entre a temperatura do pixel e o meio ambiente.

O coeficiente de convecção natural é obtido conforme a norma IEC 34-2, onde a velocidade v usada é a média das velocidades de saída do ar na tampa defletora:

$$h = 11 + 3v \tag{6.14}$$

A Figura 6.16 apresenta os pontos de medição das velocidades de saída do ar na tampa defletora do motor.

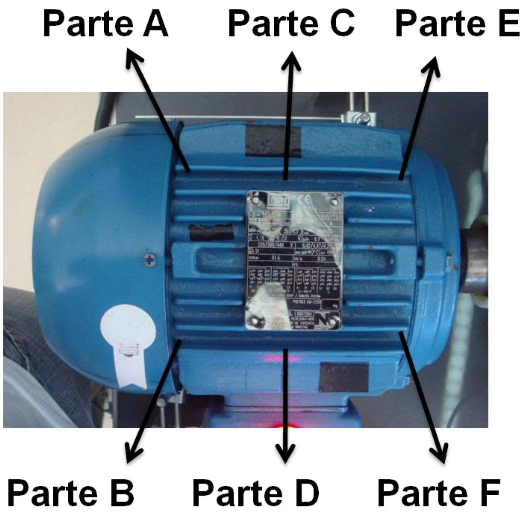


Figura 6.16 – Pontos de medição da velocidade do ar

A convecção forçada é um tipo de convecção em que o movimento de fluido é devido a uma força externa. Em motores elétricos esta parcela tem uma grande importância, devido ao ventilador fixado no final do eixo que sopra ar na direção axial. Esta forma de transferência de calor pode ser representada pela equação seguinte:

$$P_{convf} = Q \cdot \rho \cdot C_{ar} \cdot (\theta_{saida} - \theta_{entr}) \tag{6.15}$$

Onde:

Q é a vazão do ar [m^3/s];

ρ é a massa especifica do ar [kg/m^3];

c_{ar} é o calor especifico do ar [kJ/kg·K];

θ_{saida} é a temperatura do ar de saída [K];

θ_{entr} é a temperatura do ar de entrada [K].

A Figura 6.17 apresenta os pontos de medição no motor relacionados com a temperatura do ar de saída.

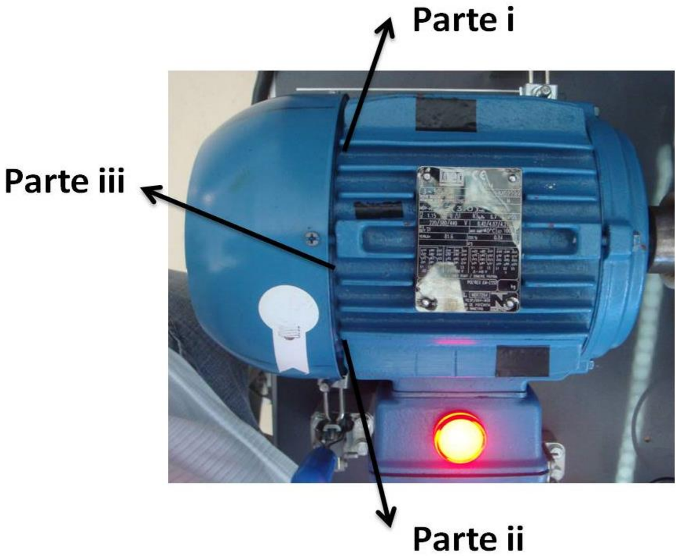


Figura 6.17 – Pontos de medição da temperatura do ar de saída

A vazão de ar que flui na ventilação forçada é dada por:

$$Q = v_f \cdot S_V \ (m^3/s) \tag{6.16}$$

Onde:

Sv é a área da tampa defletora que o ar atravessa [m^2];

v_f é a velocidade do ar da ventilação forçada [m/s].

A Figura 6.18 apresenta a tampa defletora do motor com os pontos de medição da velocidade do ar de entrada.

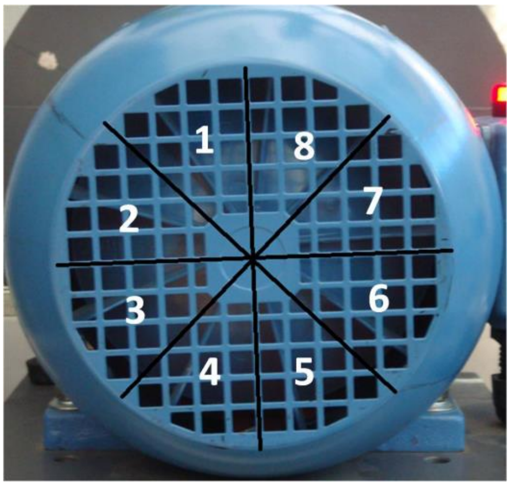


Figura 6.18 – Pontos de medição da velocidade do ar de entrada

A perda total será a soma das perdas por convecção natural e forçada.

$$Perda_{Total} = P_{conv} + P_{convf} \tag{6.17}$$

O rendimento do motor pelo método calorimétrico será dado por:

$$\eta = 1 - \frac{Perda_{Total}}{P_{el}} \tag{6.18}$$

6.3. Resultados

Neste item são apresentados os resultados de perdas e de rendimento dos motores, e também, as análises das medições realizadas com o método de separação de perdas e calorimétrico. As tabelas a seguir apresentam os valores das perdas e rendimento do motor a 100, 75 e 50 % de carregamento para os motores de 1; 2; 3; 5 e 7,5 cv.

Tabela 6.10 – Resultados motor convencional 1 cv

Separação de perdas	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Estator (W)	90,0 ± 4,9	62,2 ± 3,4	42,9 ± 3,4
Rotor (W)	31,7 ± 1,2	17,1 ± 0,9	8,1 ± 0,9
Núcleo (W)	97,3 ± 2,4	97,2 ± 2,4	97,0 ± 2,4
Atrito e ventilação (W)	9,1 ± 4,8	9,1 ± 4,8	9,1 ± 4,8
Adicionais (W)	5,3 ± 11,4	2,7 ± 5,7	1,3 ± 5,7
Total perdas (W)	233,3 ± 12,7	188,2 ± 7,2	158,5 ± 4,5
Rendimento (%)	74,8 ± 1,4	73,0 ± 1,1	67,5 ± 1,0
Termografia	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Convecção Natural (W)	98,3 ± 11,0	77,5 ± 2,7	61,4 ± 2,7
Convecção Forçada (W)	94,9 ± 28,1	81,3 ± 35,8	60,4 ± 26,0
Total perdas (W)	193,2 ± 29,1	158,8 ± 36,0	121,7 ± 26,2
Rendimento (%)	79,1 ± 3,2	77,2 ± 5,2	75,1 ± 5,4

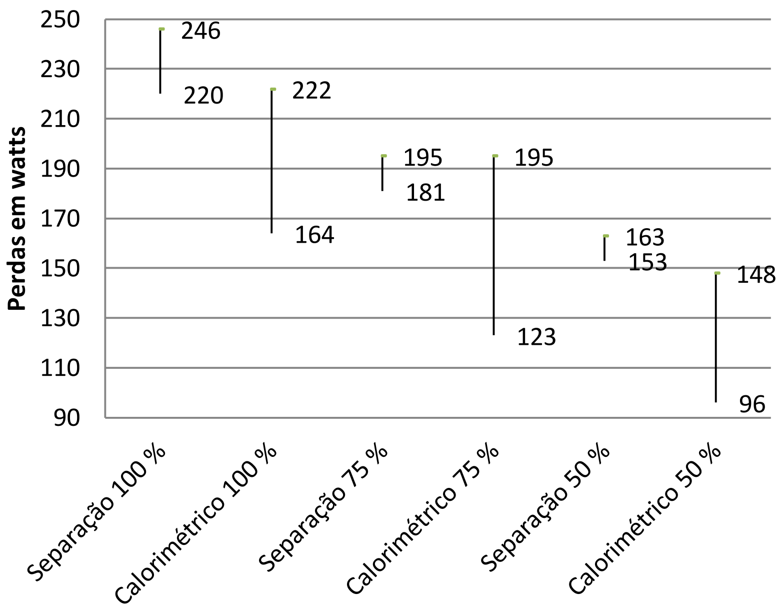


Figura 6.19 – Valores de perdas do motor convencional de 1 cv com limite superior e inferior

Observa-se que os valores apresentados na Tabela 6.10 e na Figura 6.19, que as perdas no motor de 1 cv a 100% e 75% de carga são estatisticamente iguais, o valor para 50% de carga está um pouco fora, influenciado pelo pequeno desvio padrão obtido na medida realizada pelo método de separação de perdas.

Tabela 6.11 – Resultados motor alto rendimento 1 cv

Separação de perdas	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Estator (W)	57,5 ± 4,9	62,7 ± 3,6	39,3 ± 3,6
Rotor (W)	25,7 ± 1,3	14,5 ± 1,0	7,4 ± 1,0
Núcleo (W)	71,8 ± 4,1	71,8 ± 4,1	71,8 ± 4,1
Atrito e ventilação (W)	10,4 ± 4,8	10,4 ± 4,8	10,4 ± 4,8
Adicionais (W)	35,8 ± 10,2	20,7 ± 5,9	9,5 ± 5,9
Total perdas (W)	201,1 ± 12,5	160,1 ± 10,8	138,3 ± 9,6
Rendimento (%)	79,0 ± 1,3	77,9 ± 1,2	72,6 ± 1,3
Termografia	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Convecção Natural (W)	90,4 ± 7,4	75,2 ± 5,7	62,8 ± 4,9
Convecção Forçada (W)	82,2 ± 16,7	60,0 ± 9,3	46,9 ± 11,1
Total perdas (W)	172,6 ± 18,0	135,2 ± 14,6	109,7 ± 14,5
Rendimento (%)	82,0 ± 1,9	81,4 ± 1,3	78,2 ± 2,3

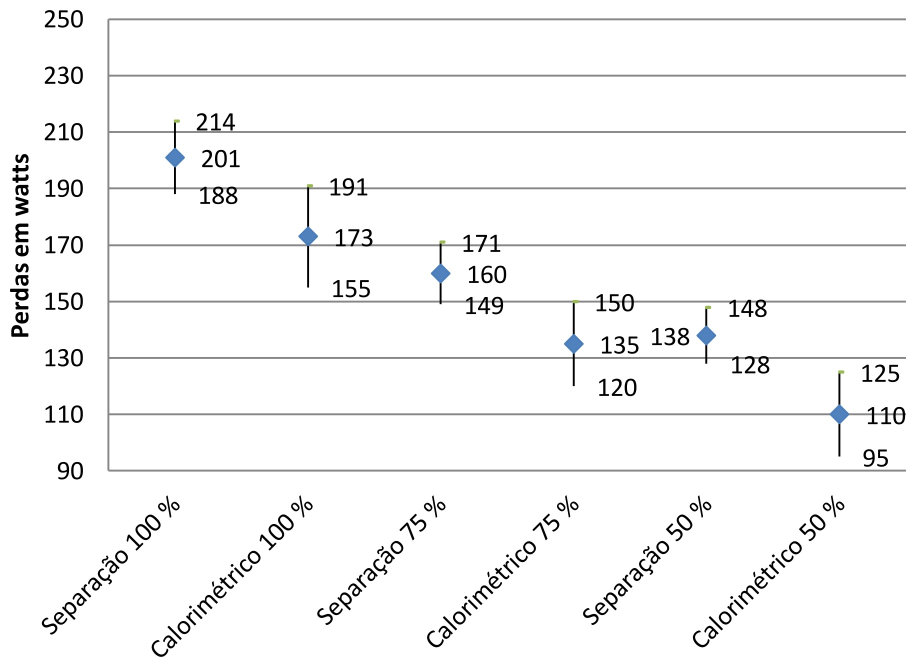


Figura 6.20 – Valores de perdas do motor alto rendimento de 1 cv com limite superior e inferior

Observa-se que os valores das perdas no motor de 1 cv a 100% e 75% de carga apresentados na Tabela 6.11 e na Figura 6.20, são estatisticamente iguais; o valor para 50% de carga apresenta uma pequena discrepância que não compromete a metodologia desenvolvida neste trabalho pois a diferença entre os valores é de 2,0%.

Tabela 6.12 – Resultados motor 2 cv

Separação de perdas	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Estator (W)	161,6 ± 8,7	106,2 ± 5,7	72,7 ± 5,7
Rotor (W)	78,9 ± 2,5	37,8 ± 1,8	15,3 ± 1,8
Núcleo (W)	117,8 ± 5,8	117,7 ± 5,8	117,6 ± 5,8
Atrito e ventilação (W)	19,7 ± 4,8	19,7 ± 4,8	19,7 ± 4,8
Adicionais (W)	35,5 ± 12,6	19,7 ± 7,0	8,6 ± 7,0
Total perdas (W)	413,5 ± 17,2	301,1 ± 11,9	233,9 ± 9,2
Rendimento (%)	76,3 ± 1,0	76,1 ± 1,0	72,2 ± 1,1
Termografia	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Convecção Natural (W)	198,1 ± 19,7	158,3 ± 4,3	127,5 ± 3,9
Convecção Forçada (W)	172,5 ± 28,0	112,3 ± 35,4	91,6 ± 23,3
Total perdas (W)	370,5 ± 32,8	270,6 ± 35,2	219,2 ± 23,4
Rendimento (%)	78,8 ± 1,9	78,5 ± 2,8	74,0 ± 2,8

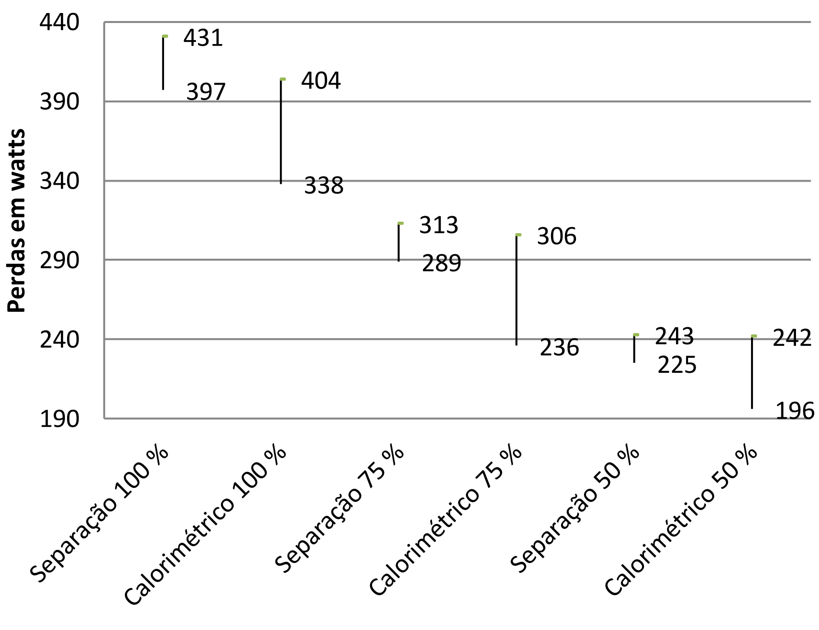


Figura 6.21 – Valores de perdas do motor de 2 cv com limite superior e inferior

Analisando os valores apresentados na Tabela 6.12 e na Figura 6.21, observa-se que as perdas no motor de 2 cv a 100%, 75% e 50% de carga são bons e estatisticamente iguais considerando o desvio padrão das medições.

Tabela 6.13 – Resultados motor WEG 3 cv alto rendimento

Separação de perdas	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Estator (W)	195,7 ± 12,4	161,8 ± 8,5	131,7 ± 8,5
Rotor (W)	96,7 ± 4,0	65,1 ± 3,1	30,7 ± 3,1
Núcleo (W)	93,8 ± 6,0	94,0 ± 6,0	94,0 ± 6,0
Atrito e ventilação (W)	16,6 ± 4,8	16,6 ± 4,8	16,6 ± 4,8
Adicionais (W)	62,6 ± 29,0	31,6 ± 15,5	16,7 ± 15,5
Total perdas (W)	465,5 ± 42,3	369,2 ± 28,6	289,8 ± 24,5
Rendimento (%)	83,0 ± 1,2	80,9 ± 1,0	79,7 ± 2,7
Termografia	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Convecção Natural (W)	233,8 ± 21,3	170,3 ± 15,5	135,0 ± 14,9
Convecção Forçada (W)	142,6 ± 28,1	127,9 ± 33,5	97,8 ± 24,4
Total perdas (W)	376,4 ± 44,6	298,2 ± 43,9	232,7 ± 34,8
Rendimento (%)	86,3 ± 1,3	84,6 ± 1,8	83,7 ± 2,6

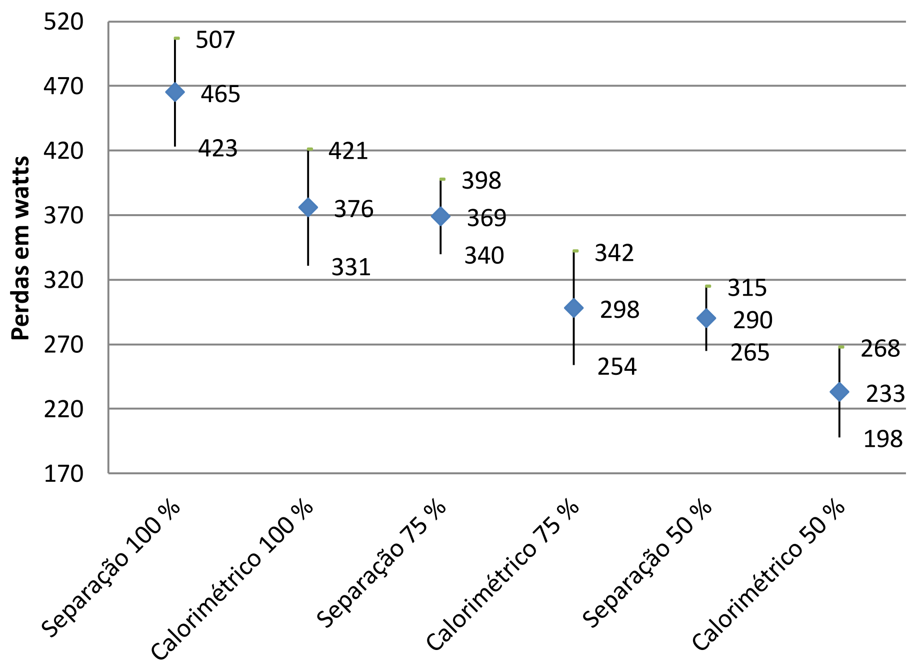


Figura 6.22 – Valores de perdas do motor WEG de 3 cv alto rendimento com limite superior e inferior

Analisando os valores apresentados na Tabela 6.13 e na Figura 6.22, observa-se que as perdas no motor de 3 cv a 100%, 75% e 50% de carga são aceitáveis e estatisticamente iguais considerando o desvio padrão das medições.

Tabela 6.14 – Resultados motor alto rendimento Metal Corte 5 cv

Separação de perdas	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Estator (W)	279,8 ± 13,9	184,7 ± 9,1	123,9 ± 9,1
Rotor (W)	154,2 ± 6,8	98,8 ± 5,0	42,4 ± 5,0
Núcleo (W)	128,1 ± 6,8	127,9 ± 6,8	127,8 ± 6,8
Atrito e ventilação (W)	27,0 ± 4,8	27,0 ± 4,8	27,0 ± 4,8
Adicionais (W)	14,6 ± 22,0	8,0 ± 13,0	3,6 ± 13,0
Total perdas (W)	603,7 ± 28,0	446,4 ± 18,1	324,7 ± 12,1
Rendimento (%)	85,8 ± 0,7	85,9 ± 0,6	85,2 ± 0,6
Termografia	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Convecção Natural (W)	274,5 ± 22,2	189,3 ± 5,7	149,9 ± 5,6
Convecção Forçada (W)	292,7 ± 50,5	236,1 ± 39,9	184,2 ± 35,9
Total perdas (W)	567,2 ± 54,6	425,4 ± 40,3	334,1 ± 36,3
Rendimento (%)	86,6 ± 1,3	86,5 ± 1,3	84,7 ± 1,7

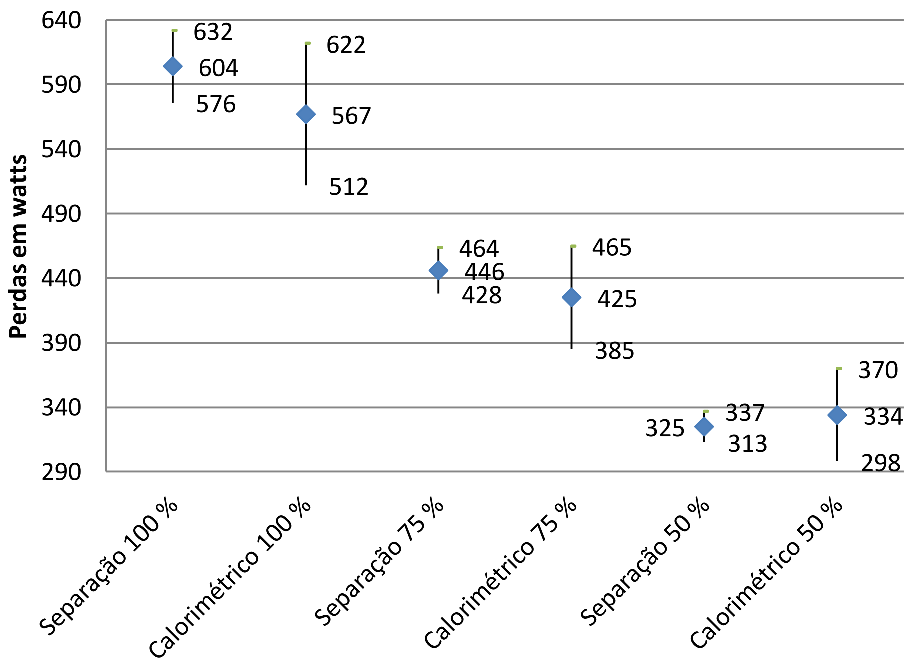


Figura 6.23 – Valores de perdas do motor alto rendimento de 5 cv com limite superior e inferior

Com relação aos valores de perdas obtidos no ensaio do motor de 5 cv, observa-se que valores por separação de perdas e calorimétrico a 100%, 75% e 50% de carga apresentados Tabela 6.14 na e Figura 6.23, são excelentes e estatisticamente iguais considerando a incerteza da medição.

Tabela 6.15 – Resultados motor convencional 5 cv

Separação de perdas	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Estator (W)	295,5 ± 15,6	187,94 ± 9,9	120,9 ± 9,9
Rotor (W)	160,1 ± 6,4	90,22 ± 4,7	40,6 ± 4,7
Núcleo (W)	283,5 ± 13,6	283,5 ± 13,6	283,5 ± 13,6
Atrito e ventilação (W)	13,6 ± 4,8	13,6 ± 4,8	13,6 ± 4,8
Adicionais (W)	53,5 ± 21,4	29,1 ± 11,6	12,8 ± 11,6
Total perdas (W)	806,2 ± 33,3	604,3 ± 25,5	471,4 ± 22,3
Rendimento (%)	81,9 ± 0,8	81,6 ± 0,8	78,9 ± 0,9
Termografia	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Convecção Natural (W)	327,9 ± 51,2	266,5 ± 8,8	198,8 ± 5,5
Convecção Forçada (W)	406,9 ± 65,7	336,9 ± 63,4	239,9 ± 78,0
Total perdas (W)	734,8 ± 79,2	603,4 ± 63,9	438,7 ± 78,2
Rendimento (%)	83,5 ± 1,8	81,6 ± 2,0	80,4 ± 3,5

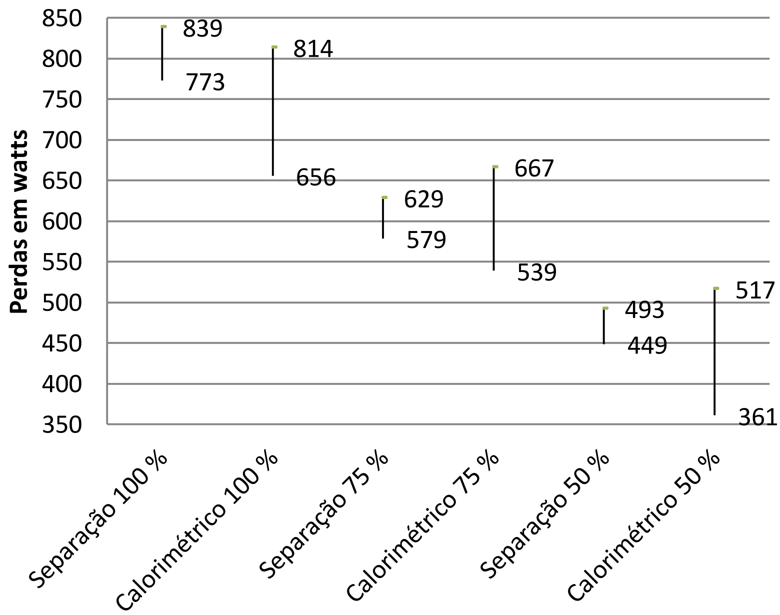


Figura 6.24 – Valores de perdas do motor convencional de 5 cv com limite superior e inferior

Com relação ao motor convencional de 5 cv, verifica-se que valores de perdas por separação e calorimétrico a 100%, 75% e 50% de carga apresentados na Tabela 6.15 e Figura 6.24, são bons e estatisticamente iguais considerando a incerteza da medição.

Tabela 6.16 – Resultados motor WEG de 7,5 cv

Separação de perdas	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Estator (W)	365,0 ± 29,7	225,3 ± 22,2	138,4 ± 18,2
Rotor (W)	252,1 ± 19,5	145,9 ± 7,0	55,0 ± 7,0
Núcleo (W)	290,3 ± 7,8	290,5 ± 7,8	290,6 ± 7,8
Atrito e ventilação (W)	38,3 ± 4,8	38,3 ± 4,8	38,3 ± 4,8
Adicionais (W)	143,6 ± 12,7	79,5 ± 7,0	34,1 ± 7,0
Total perdas (W)	1089,2 ± 46,8	779,5 ± 28,1	556,4 ± 29,6
Rendimento (%)	83,3 ± 0,4	83,9 ± 0,4	82,7 ± 0,4
Termografia	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Convecção Natural (W)	426,3 ± 59,4	392,7 ± 50,6	309,2 ± 38,8
Convecção Forçada (W)	423,7 ± 81,1	271,5 ± 75,2	144,9 ± 50,9
Total perdas (W)	850,0 ± 112,6	664,2 ± 105,7	454,1 ± 71,6
Rendimento (%)	87,0 ± 2,0	86,2 ± 3,0	85,9 ± 1,7

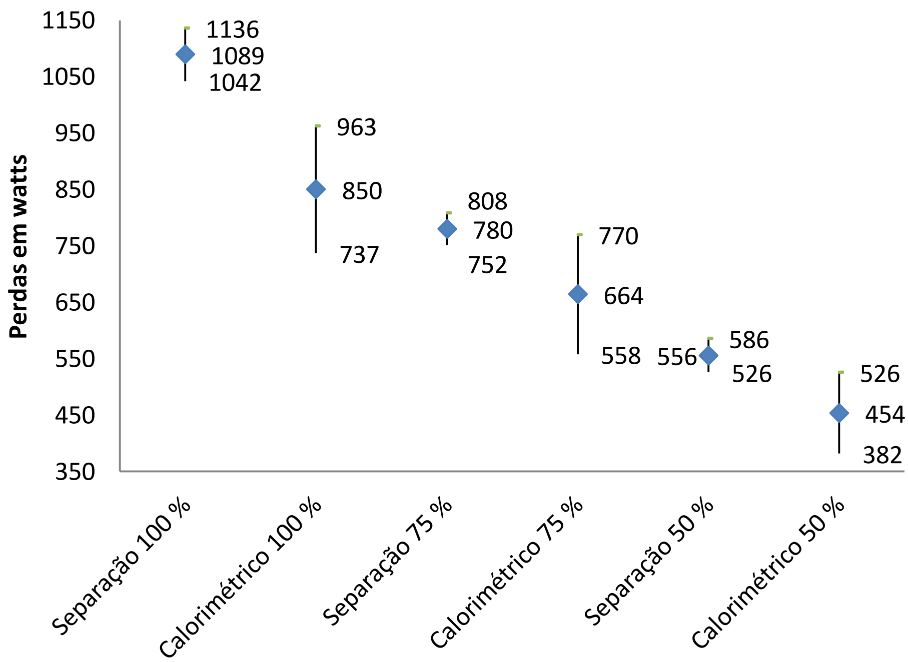


Figura 6.25 – Valores de perdas do motor WEG de 7,5 cv com limite superior e inferior

Com relação ao motor WEG de 7,5 cv, verifica-se que valores de perdas por separação e calorimétrico a 75% e 50% de carga apresentados na Tabela 6.16 e na Figura 6.25, são aceitáveis e estatisticamente iguais considerando a incerteza da medição. Com relação aos valores das perdas a 100% de carregamento estão um pouco fora dos valores esperados.

Tabela 6.17 – Resultados motor Eberle de 7,5 cv

Separação de perdas	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Estator (W)	296,2 ± 9,7	168,2 ± 8,8	111,5 ± 8,8
Rotor (W)	263,9 ± 13,7	164,1 ± 6,8	61,3 ± 6,8
Núcleo (W)	215,6 ± 6,2	215,6 ± 6,2	215,6 ± 6,2
Atrito e ventilação (W)	28,3 ± 4,8	28,3 ± 4,8	28,3 ± 4,8
Adicionais (W)	138,1 ± 35,2	73,7 ± 18,8	30,3 ± 18,8
Total perdas (W)	942,1 ± 39,6	649,8 ± 22,8	447,2 ± 12,5
Rendimento (%)	85,7 ± 0,6	86,4 ± 0,5	85,9 ± 0,4
Termografia	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Convecção Natural (W)	467,9 ± 57,8	394,5 ± 10,6	294,1 ± 8,7
Convecção Forçada (W)	301,4 ± 39,9	232,5 ± 26,2	192,0 ± 31,3
Total perdas (W)	769,3 ± 68,0	627,1 ± 28,2	486,1 ± 32,4
Rendimento (%)	88,3 ± 1,0	86,9 ± 0,6	84,7 ± 1,0

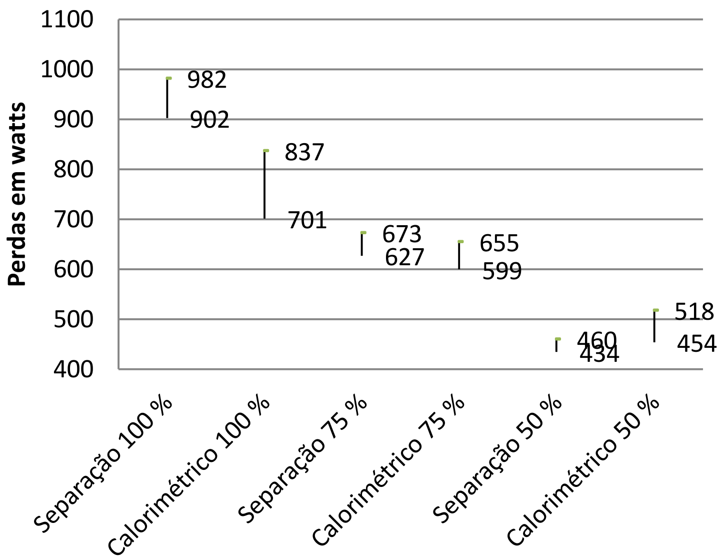


Figura 6.26 – Valores de perdas do motor Eberle de 7,5 cv com limite superior e inferior

Com relação ao motor Eberle de 7,5 cv, verifica-se que valores de perdas por separação e calorimétrico a 75% e 50% de carga apresentados na Tabela 6.17 e na Figura 6.26, são bons e estatisticamente iguais considerando a incerteza da medição. Observa-se uma pequena discrepância nos valores obtidos para as perdas a 100% de carregamento.

Analisando os resultados obtidos observa-se que a metodologia para medição das perdas e rendimento através do método calorimétrico apresenta valores bastante confiáveis, colaborando para a validação da metodologia proposta neste trabalho.

Com o objetivo de avaliar a influência externa foi realizado um ensaio no motor convencional WEG de 3 cv sem e com a instalação de um ventilador. A Tabela 6.18 a seguir apresenta as características do motor.

Tabela 6.18 – Dados de placa do motor convencional WEG de 3 cv

Modelo	90 L	Fabricante	WEG
Classe de isolamento	B	Potência	3 cv
Frequência	60 Hz	Corrente	8,59 A
Rotação	1710 rpm	Tensão	220 V
Fator de Serviço	1,15	Rendimento	79,3%
Grau de proteção	IP54	Fator de potência	0,85
Categoria de conjugado	N	Ip/In	6,8

A Figura 6.27 mostra a bancada de teste e o ventilador instalado durante a realização dos ensaios.



Figura 6.27 – Ensaio no motor de 3 cv com ventilador

As tabelas e as figuras a seguir apresentam os resultados dos ensaios sem e com a instalação do ventilador.

Tabela 6.19 – Resultados motor convencional WEG 3 cv sem ventilador

Separação de perdas	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Estator (W)	228,3 ± 12,1	147,1 ± 7,8	109,7 ± 7,8
Rotor (W)	116,8 ± 4,0	63,5 ± 2,8	30,2 ± 2,8
Núcleo (W)	159,2 ± 6,8	159,2 ± 6,8	159,2 ± 6,8
Atrito e ventilação (W)	11,6 ± 4,8	11,6 ± 4,8	11,6 ± 4,8
Adicionais (W)	117,7 ± 64,1	58,8 ± 33,0	30,0 ± 23,0
Total perdas (W)	633,4 ± 65,8	440,2 ± 34,8	341,2 ± 19,5
Rendimento (%)	77,1 ± 2,4	76,8 ± 1,9	75,2 ± 1,5
Termografia	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Convecção Natural (W)	306,4 ± 23,0	202,0 ± 15,2	158,1 ± 19,7
Convecção Forçada (W)	211,6 ± 25,2	156,2 ± 21,6	122,0 ± 15,6
Total perdas (W)	518,0 ± 48,3	358,2 ± 32,7	280,1 ± 30,3
Rendimento (%)	81,3 ± 1,2	81,1 ± 0,7	79,6 ± 1,3

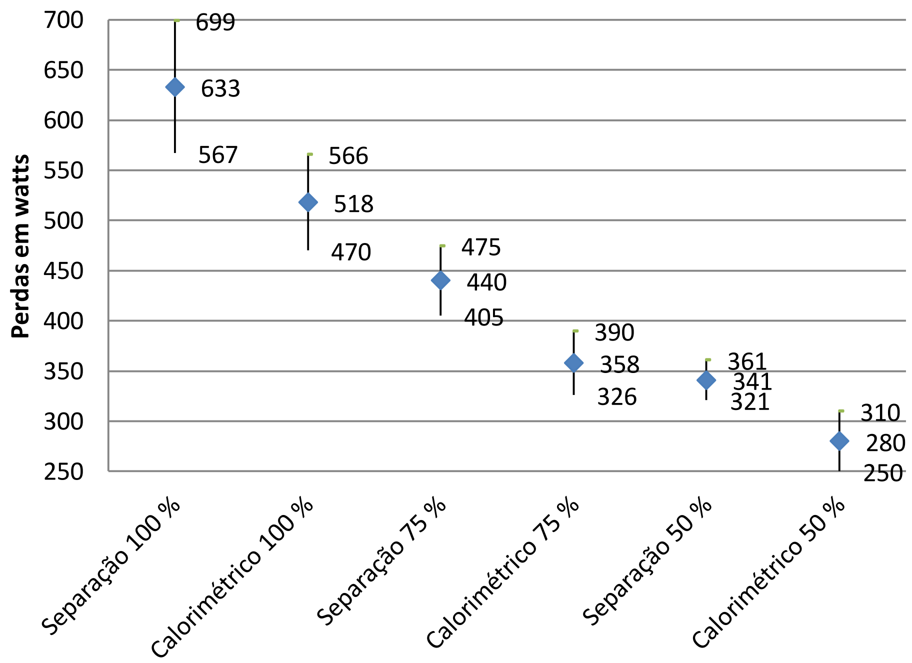


Figura 6.28 – Perdas do motor WEG convencional de 3 cv com limite superior e inferior (sem ventilador)

Tabela 6.20 – Resultados motor WEG convencional 3 cv com ventilador

Separação de perdas	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Estator (W)	228,3 ± 12,1	147,1 ± 7,8	109,7 ± 7,8
Rotor (W)	116,8 ± 4,0	63,5 ± 2,8	30,2 ± 2,8
Núcleo (W)	159,1 ± 6,8	159,2 ± 6,8	159,8 ± 6,8
Atrito e ventilação (W)	11,6 ± 4,8	11,6 ± 4,8	11,6 ± 4,8
Adicionais (W)	115,0 ± 67,3	57,5 ± 34,7	29,3 ± 17,7
Total perdas (W)	630,7 ± 68,9	438,8 ± 36,5	340,6 ± 20,2
Rendimento (%)	77,2 ± 2,5	76,9 ± 1,9	75,2 ± 1,6
Termografia	**100 % carga**	**75 % carga**	**50 % carga**
Convecção Natural (W)	303,6 ± 32,3	211,3 ± 16,4	177,0 ± 15,8
Convecção Forçada (W)	219,1 ± 24,9	152,4 ± 17,2	106,9 ± 14,4
Total perdas (W)	522,7 ± 42,1	363,7 ± 28,5	283,8 ± 25,5
Rendimento (%)	81,0 ± 1,4	80,8 ± 1,0	79,3 ± 1,2

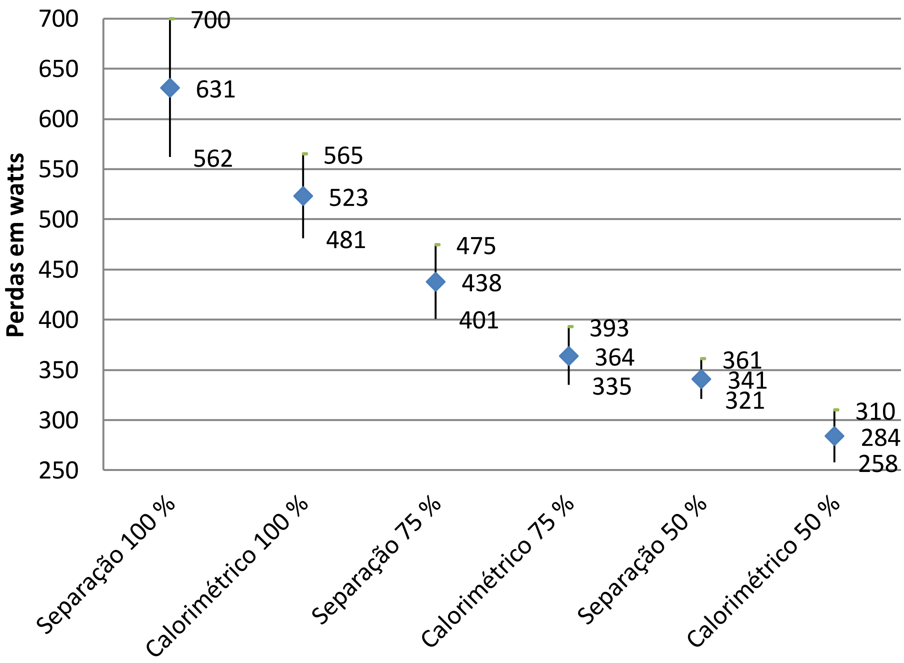


Figura 6.29 – Perdas do motor WEG convencional de 3 cv com limite superior e inferior (com ventilador)

Analisando os valores apresentados nas tabelas e figuras anteriores, observa-se que a instalação do ventilador não influiu nos valores de perdas, porém foi observado um aumento na velocidade de escoamento do ar na superfície do motor.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta para determinação de perdas e rendimento em motores elétricos empregando a termografia infravermelha, para tanto, foi levantado o estado da arte referente às técnicas para a medição de perdas em motores; estudado o processo de transferência de calor, e também, os procedimentos para a operação de câmeras termográficas; onde as perdas foram determinadas através da utilização do método de separação de perdas e comparadas com os resultados dos ensaios realizados pela metodologia proposta no trabalho através da análise das imagens termográficas.

Para validar a metodologia proposta foram ensaiados no laboratório do LEPCH, 9 motores de indução trifásicos com potências de 1; 2; 3; 5 e 7,5 cv; sendo que um motor convencional de 3 cv foi ensaiado com e sem a influência de um ventilador externo.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios, verificou-se que, embora a proposta inicial fosse apresentar uma metodologia expedita, o método demonstrou que: o motor de 2 cv; o motor de alto rendimento de 3 cv; o motor convencional de 5 cv e o motor de alto rendimento de 5 cv; os resultados foram bastante precisos quando comparados com os valores obtidos por métodos normatizados e com os dados de placa declarados pelo fabricante.

O motor WEG de 7,5 cv apresentou valores de perdas e rendimento diferente para a condição de carregamento nominal, mas que não inviabiliza a metodologia, pois as perdas obtidas a 75% e 50% foram de acordo com o esperado entre os dois métodos. A discrepância nos valores de perdas a 100% de carga.

Com relação ao motor Eberle de 7,5 cv, verificou-se que valores de perdas por separação e calorimétrico a 75% e 50% de carga foram bons e estatisticamente iguais considerando a incerteza da medição; e uma pequena discrepância nos valores obtidos para as perdas a 100% de carregamento.

Com relação aos motores convencional e de alto rendimento com potência de 1 cv; verificou-se que os valores de rendimento estão dentro de uma faixa aceitável para motores deste porte.

A instalação do ventilador no ensaio do motor convencional de 3 cv não influenciou nos valores de perdas, porém foi observado um pequeno aumento na velocidade de escoamento do ar na superfície do motor.

Os resultados encontrados para os valores de rendimento dos motores estão muito próximos dos valores esperados para máquinas do porte que foram analisados, mas existe a plena consciência de que alguns fatores podem afetar os resultados, como por exemplo, a medição da temperatura ambiente.

A medição das perdas e do rendimento através do método de separação de perdas necessita que os equipamentos estejam com os certificados de aferição em ordem para evitar possíveis erros durante a medição.

Deve se tomar os cuidados necessários para os ajustes iniciais da câmera infra vermelha durante a realização das imagens termográficas e a câmera deve ser operada por técnicos que possuam certificação para a utilização.

Caso exista a contribuição de outras fontes de calor, como por exemplo um forno próximo ao motor, será necessário ajustar a temperatura da radiação refletida pelo método do radiador de Lambert para cada parte da superfície do motor.

As perdas por radiação nas tampas do motor e por condução nos pés do motor são pouco relevantes quando comparadas com as outras perdas e foram desconsideradas pela metodologia proposta.

Apesar de mais precisos, a utilização de termopares na medição da temperatura em determinados pontos de superfícies, não apresenta eficiência se comparada com a utilização do processamento de imagens, ou isotermas associadas às respectivas áreas, pois necessita do desligamento do motor.

A utilização da termografia infravermelha permite realizar uma análise do motor sem a necessidade de parada do motor comprovando a praticidade da metodologia, dispensando montagem de equipamentos de medição provisórios.

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros sugere-se calcular o coeficiente de convecção natural do motor utilizando a técnica de simulação numérica/computacional do

processo físico-químico relacionado com o escoamento de ar, como por exemplo, o software de simulação CFD - *Computational Fluid Dynamics*.

Como não foi possível realizar testes em motores elétricos com potência acima de 10 cv na bancada de ensaio existente, sugere-se também, utilizar a metodologia proposta e realizar os cálculos das perdas e rendimento em motores com potências maiores.

REFERÊNCIAS

AGAMLOH, E. B.; WALLACE, A. K.; JOUANNE, A.; ANDERSON, K. J. AND ROOKS, J. A.***, Assessment of Nonintrusive Motor Efficiency Estimators***. *IEEE Transactions on Industry Applications*, volume 41, número 1, janeiro/fevereiro 2005.

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R.**; Fundamentos de metrologia científica e industrial.** Barueri, São Paulo, Editora Manole, 2010, 408 p.

ALMEIDA, A., T. DE; FERREIRA, F. J. T. E.; BUSCH, J. F.; ANGERS, P., ***Comparative Analysis of IEEE 112-B and IEC 34-2 Efficiency Testing Standards Using Stray Load Losses in Low-Voltage Three-Phase, Cage Induction Motors.*** *IEEE Transactions on Industry Applications*, volume 38, número 2, março/abril 2002.

BOGLIETTI, A.; CAVAGNINO, A.; LAZZARI, M.; PASTORELLI, M., ***International Standards for the Induction Motor Efficiency Evaluation: A Critical Analysis of the Stray-Load Loss Determination.*** *IEEE Transactions on Industry Applications*, volume 40, número 5, setembro/outubro 2004.

BORTONI, E. C.; YAMACHITA, R. A.; GUIMARAES, J. M. C.; SANTOS, M. C. C., ***Losses determination in induction motors using infrared thermography techniques.*** *8th International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS' 2013)*, 28 a 30 de Outubro, 2013, Rio de Janeiro, Brasil.

BORTONI, E. C.; NOGUEIRA, L. A.H.; CARDOSO, R.B.; HADDAD, J.; SOUZA, E. P.; DIAS, M. V. X.; YAMACHITA, R. A. ***Assessment of the achieved savings from induction motors energy efficiency labeling in Brazil.*** *Energy Conversion and Management*, volume 75, novembro 2013.

BORTONI, E. C.; HADDAD, J.; SANTOS, A. H. M.; AZEVEDO, E. M.; YAMACHITA, R. A. ***Analysis of Repairs on Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors Performance.*** *IEEE Transactions on Energy Conversion*, volume 22, número 2, junho 2007.

BORTONI, E.C.; SINISCALCHI, R.T.; JARDINI, J.A.***, Hydro generator efficiency assessment using infrared thermal imaging techniques.*** *Power and Energy Society General Meeting*, Minneapolis, julho, 2010.

BORTONI, E. C.; HADDAD, J.; YAMACHITA, R. A.; ET ALLI.; **Eficiência Energética: Teoria e Prática.** Fupai, Unifei, PROCEL/Eletrobras, 2007.

BORTONI, E. C.; HADDAD, J.; YAMACHITA, R. A.; ET ALLI.**; Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações.** Fupai, Unifei, PROCEL/Eletrobras, 2006.

BOUSBAINE, A.; LOW, W. F. AND MCCORMICK, M. ***Novel approach to measurements of iron and stray load losses in induction motors.*** *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, volume 143, número 1, janeiro 1996.

BRADLEY, J. K.; CAO, W.; PADILLA, J. A. ***Evaluation of Stray Load Loss in Induction Motors with a Comparison of Input–Output and Calorimetric Methods.*** *IEEE Transactions on Energy Conversion*, volume 21, número 3, setembro, 2006.

CARLOMAGNO, G. M.; DISCETTI, S. AND ASTARITA, **T. *Experimental assessment of a new technique for measuring heat transfer coefficients.*** *10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, julho, 2010, Québec, Canada.

CHRZANOWSKI, K.; ***Non-Contact Thermometry - Measurement errors.*** *SPIE PL, Research and development Treaties*, volume 7, Warsaw, 2001.

CSA STANDARD C390. ***Energy Efficiency Test Methods for Three-Phase Induction Motors.*** 1993.

DEL TORO, V., **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Editora Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1994.

EPPERLY, R. A.; HEBERLEIN, G. E.; AND EADS, L. G.**, *Thermography: a Tool for Reliability and Safety.*** *IEEE Industry Applications Magazine*, volume 5, número 1, janeiro/fevereiro, 1999.

FLIR SYSTEM, **Manual de instruções do termovisor InfraCAM SD**, fevereiro, 2007.

HSU, J. S.; KUECK, J. D., OLSZEWSKI, M.; CASADA, D. A.; OTADUY, P. J. AND TOLBERT, L. M.; ***Comparison of Induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods.*** *IEEE Transactions on Industry Applications*, volume 34, número. 1, janeiro/fevereiro 1998.

IEC STD 60034-2, ***Rotating electrical machines. Part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles) Measurement of losses by the calorimetric method.*** 1996.

IEC 61972, ***Method for determining losses and efficiency of three phase cage induction motors.*** 2002.

IEEE STD 112, ***IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators***. *IEEE Power Engineering Society*, 2004.

JEC 37, ***Induction Machine***. *Standard of Japanese Electrotechnical Committee*.

KAPLAN, H.; **Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment.** Editora Spie, Bellingham, Washington, USA, 2007.

LITMAN, T.; MACCOY, G. A.; DOUGLASS, J. G.; ***Energy Efficient Electric Motor Selection Handbook.*** *Washington State Energy Office*, outubro, 1990.

LITWA, M., ***Influence of Angle of View on Temperature Measurements Using Thermovision Camera.*** *IEEE Sensors Journal*, volume 10, número 10, outubro, 2010.

LU, B.; HABETLER, T. G.; AND HARLEY, R. G.; ***A Survey of Efficiency-Estimation Methods for In-Service Induction Motors.*** *IEEE Transactions on Industry Applications*, volume 42, número. 4, julho/agosto, 2006.

MALDAGUE, XAVIER P.V.; MOORE, PATRICK O.; ***Infrared and Thermal Testing*.** Volume 3 ASNT 2001.

MUNDIM, K. C. **A Luz e a Teoria Quântica.** Instituto de Química, Brasília, 1997.

NARROL, M.; STIVER, W.; ***Quantitative Thermography for Electric Motor Efficiency Diagnosis***. *University of Guelph*, 2008.

NBR 5383-1, **Máquinas elétricas girantes Parte 1: Motores de indução trifásicos – Ensaios.** Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, abril, 2002.

NBR 5052, **Máquina síncrona – Ensaios.** Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, janeiro, 1984.

NBR 17094, **Máquinas elétricas girantes - Motores de indução.** Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, outubro, 2008.

PAZZINI, L. H. A., **Acionamentos Elétricos**. Faculdades Integradas de São Paulo – FISP, São Paulo, 2007.

RODENAS, M. J. P.; ROYO R.; DAVIU, J. A.; FOLCH, J. R. **Energy balance and heating curves of electric motors based on Infrared Thermography.** *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2011.

SANTOS, L. DOS; **Classificação e Modelagem de Fatores de Influência sobre Inspeções Termográficas em Ambientes Desabrigados.** Tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, 2012.

SANTOS, L. DOS; **Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas.** Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá, 2006.

SIEGEL, R.; HOWELL, J. R.; ***Thermal Radiation Heat Transfer.*** *McGraw-Hill Kogakusha*, *Tokyo*, 1972.

STATON, D.; BOGLIETTI, A. AND CAVAGNINO, A.; ***Solving the More Difficult Aspects of Electric Motor Thermal Analysis in Small and Medium Size Industrial Induction Motors.*** *IEEE Transactions on Energy Conversion*, volume 20, número. 3, setembro, 2005.

SZABADOS, B. AND MIHALCEA, A., ***Design and Implementation of a Calorimetric Measurement Facility for Determining Losses in Electrical Machines.*** *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Budapeste, Hungria, maio, 2001.

SINISCALCHI, R. T., **Determinação do Rendimento de Hidrogeradores Utilizando Técnicas de Termografia Infravermelha.** Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá, 2009.

TESTO, **Manual do fabricante do anemômetro térmico Texto 425**, Alemanha, 2010.

TOGINHO FILHO, D. O., ANDRELLO, A.C., **Catálogo de Experimentos do Laboratório Integrado de Física Geral.** Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina, Março de 2009.

YOON, M. K.; JEON, C. S.; KAUH, S. K., ***Efficiency Increase of an Induction Motor by Improving Cooling Performance.*** *IEEE Transactions on Energy Conversion*, volume 17, número 1, março, 2002.

Anexo 1 – Roteiro para análise de erros

Precisão

Em função das características dos equipamentos existentes na bancada do LEPCH, serão utilizadas as seguintes precisões no ensaio dos motores de indução:

Corrente (I): 0,25% do fundo de escala (5A)

Tensão (U): 0,15% do fundo de escala (350V)

Torque (T): 0,5% do valor medido

Rotação (rpm): 0,15% do valor medido

Potência Elétrica (Pe): 0,5% do valor medido

Resistência (R): 0,2% do valor medido

Temperatura Ambiente (θ_{amb}): 0,25ºC (Metade da menor divisão)

Desvio Padrão (σ)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}$$

Onde:

n é o número de medições

$\overline{x}$ é a média das medições

x_ié o valor da medição i

Erro do tipo A (u_a)

$$u_a = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Erro do tipo B (u_b):

$$u_b = \frac{\bar{x}}{\sqrt{j}} \cdot \text{precisão}$$

Onde:

J é igual a 3 para distribuições retangulares e 6 para triangulares

Erro do tipo B (Resolução) (u_{bres})

$$u_{bres} = \frac{\text{resolução}}{2 \cdot \sqrt{3}}$$

Incerteza Combinada (u_c)

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2 + u_{bres}^2}$$

Número de grau de liberdade efetivo (GL)

$$GL = \frac{uc^4}{\frac{u_a^4}{gl_a} + \frac{u_b^4}{gl_b} + \frac{u_{bres}^4}{gl_{res}}}$$

Onde:

$$gl = n - 1$$

Para medições e para propagações se utiliza o GL das variáveis envolvidas

Fator de Student (t)

Com o valor de GL se consulta a tabela de student, com a precisão desejada.

Incerteza Expandida ()

$$U = u_c \cdot t$$

Determinação das grandezas necessárias para separação de perdas

Ensaio de rotor livre

Corrente (I)

1. Obter a média das medições para tensão nominal
2. Obter o desvio padrão das medições
3. Obter o erro do tipo A
4. Obter o erro tipo B a partir da incerteza do equipamento
5. Obter o erro do tipo B para resolução
6. Obter a incerteza combinada
7. Obter o grau de liberdade efetivo
8. Obter o fator de Student para 95,45%
9. Expandir a incerteza
10. Repetir o processo para I_A I_B I_C

Tensão (U)

1. Obter a média das medições para tensão nominal
2. Obter o desvio padrão das medições
3. Obter o erro do tipo A
4. Obter o erro tipo B a partir da incerteza do equipamento
5. Obter o erro do tipo B para resolução.
6. Obter a incerteza combinada
7. Obter o grau de liberdade efetivo.
8. Obter o fator de Student para 95,45%
9. Expandir a incerteza
10. Repetir o processo para U_{an} U_{bn} U_{cn}

Potência elétrica (Pe)

1. Obter a média das medições de potência elétrica
2. Erros do tipo A não são considerados

3. Obter o erro tipo B a partir da incerteza do equipamento
4. Obter o erro do tipo B para resolução
5. Obter a incerteza combinada
6. Obter o grau de liberdade efetivo
7. Obter o fator de Student
8. Expandir a incerteza

Corrente Média (I_{med})

1. Obter a média das correntes $I_{med} = \frac{1}{3} \cdot (I_A + I_B + I_C)$
2. Obter a incerteza combinada

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{dI_{med}}{dI_A} \cdot u_{cI_A}\right)^2 + \left(\frac{dI_{med}}{dI_B} \cdot u_{cI_B}\right)^2 + \left(\frac{dI_{med}}{dI_C} \cdot u_{cI_C}\right)^2}$$

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{1}{3} \cdot u_{cI_A}\right)^2 + \left(\frac{1}{3} \cdot u_{cI_B}\right)^2 + \left(\frac{1}{3} \cdot u_{cI_C}\right)^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo

$$GL = \frac{u_c^4}{\frac{\left(\frac{dI_{med}}{dI_A} \cdot u_{cI_A}\right)^4}{gl_{I_A}} + \frac{\left(\frac{dI_{med}}{dI_B} \cdot u_{cI_B}\right)^4}{gl_{I_B}} + \frac{\left(\frac{dI_{med}}{dI_C} \cdot u_{cI_C}\right)^4}{gl_{I_C}}}$$

4. Obter o fator de Student para 95,45%
5. Expandir a incerteza

Tensão Média (U_{med})

1. Obter a média das tensões $U_{med} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot (U_{an} + U_{bn} + U_{cn})$
2. Obter a incerteza combinada

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{dU_{med}}{dU_{an}} \cdot u_{cU_{an}}\right)^2 + \left(\frac{dU_{med}}{dU_{bn}} \cdot u_{cU_{bn}}\right)^2 + \left(\frac{dU_{med}}{dU_{Cn}} \cdot u_{cU_{Cn}}\right)^2}$$

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot u_{cU_{an}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot u_{cU_{bn}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot u_{cU_{Cn}}\right)^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo

$$\mathrm{GL} = \frac{\mathrm{u_c^4}}{\frac{\left(\frac{\mathrm{dI_{med}}}{\mathrm{dI_A}} \cdot \mathrm{u_{cU_{an}}}\right)^4}{\mathrm{gl_{U_{an}}}} + \frac{\left(\frac{\mathrm{dI_{med}}}{\mathrm{dI_B}} \cdot \mathrm{u_{cU_{bn}}}\right)^4}{\mathrm{gl_{U_{bn}}}} + \frac{\left(\frac{\mathrm{dI_{med}}}{\mathrm{dI_C}} \cdot \mathrm{u_{cU_{Cn}}}\right)^4}{\mathrm{gl_{U_{Cn}}}}}$$

4. Obter o fator de Student para 95,45%
5. Expandir a incerteza

Ensaio de Carga

Rotação (rpm)

1. Obter a média das medições de rotação
2. Obter o desvio padrão das medições
3. Obter o erro do tipo A
4. Obter o erro tipo B a partir da incerteza do equipamento
5. Obter o erro do tipo B para resolução
6. Obter a incerteza combinada
7. Obter o grau de liberdade efetivo
8. Obter o fator de Student para 95,45%
9. Expandir a incerteza

Torque (T)

1. Obter a média das medições de torque
2. Obter o desvio padrão das medições
3. Obter o erro do tipo A
4. Obter o erro tipo B a partir da incerteza do equipamento
5. Obter o erro do tipo B para resolução
6. Obter a incerteza combinada
7. Obter o grau de liberdade efetivo
8. Obter o fator de Student para 95,45%
9. Expandir a incerteza

Corrente (I)

1. Obter a média das medições de corrente
2. Obter o desvio padrão das medições
3. Obter o erro do tipo A
4. Obter o erro tipo B a partir da incerteza do equipamento
5. Obter o erro do tipo B para resolução
6. Obter a incerteza combinada
7. Obter o grau de liberdade efetivo
8. Obter o fator de Student para 95,45%
9. Expandir a incerteza
10. Repetir o processo para I_A I_B I_C

Tensão (U)

1. Obter a média das medições de tensão
2. Obter o desvio padrão das medições
3. Obter o erro do tipo A
4. Obter o erro tipo B a partir da incerteza do equipamento
5. Obter o erro do tipo B para resolução
6. Obter a incerteza combinada
7. Obter o grau de liberdade efetivo
8. Obter o fator de Student para 95,45%
9. Expandir a incerteza
10. Repetir o processo para $\mathrm{U_{an}}$ $\mathrm{U_{bn}}$ $\mathrm{U_{cn}}$

Potência elétrica (Pe)

1. Obter a média das medições de potência elétrica
2. Erros do tipo A não são considerados
3. Obter o erro tipo B a partir da incerteza do equipamento
4. Obter o erro do tipo B para resolução
5. Obter a incerteza combinada
6. Obter o grau de liberdade efetivo
7. Obter o fator de Student
8. Expandir a incerteza

Resistência (R)

1. Como somente uma medição é feita não se calcula a média
2. Erros do tipo A não são considerados
3. Obter o erro tipo B a partir da incerteza do equipamento
4. Obter o erro do tipo B para resolução
5. Obter a incerteza combinada
6. Obter o grau de liberdade efetivo
7. Obter o fator de Student
8. Expandir a incerteza
9. Repetir o processo para R_A R_B R_C

Corrente Média (I_{med})

1. Obter a média das correntes $\mathrm{I_{med}} = \frac{1}{3} \cdot (\mathrm{I_A} + \mathrm{I_B} + \mathrm{I_C})$
2. Obter a incerteza combinada

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{dI_{med}}{dI_A} \cdot u_{cI_A}\right)^2 + \left(\frac{dI_{med}}{dI_B} \cdot u_{cI_B}\right)^2 + \left(\frac{dI_{med}}{dI_C} \cdot u_{cI_C}\right)^2}$$

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{1}{3} \cdot u_{cI_A}\right)^2 + \left(\frac{1}{3} \cdot u_{cI_B}\right)^2 + \left(\frac{1}{3} \cdot u_{cI_C}\right)^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo

$$GL = \frac{u_c^4}{\frac{\left(\frac{dI_{med}}{dI_A} \cdot u_{cI_A}\right)^4}{gl_{I_A}} + \frac{\left(\frac{dI_{med}}{dI_B} \cdot u_{cI_B}\right)^4}{gl_{I_B}} + \frac{\left(\frac{dI_{med}}{dI_C} \cdot u_{cI_C}\right)^4}{gl_{I_C}}}$$

4. Obter o fator de Student para 95,45%
5. Expandir a incerteza

Tensão Média (U_{med})

1. Obter a média das tensões $\mathrm{U_{med}} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot (\mathrm{U_{an}} + \mathrm{U_{bn}} + \mathrm{U_{cn}})$
2. Obter a incerteza combinada

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{dU_{med}}{dU_{an}} \cdot u_{cU_{an}}\right)^2 + \left(\frac{dU_{med}}{dU_{bn}} \cdot u_{cU_{bn}}\right)^2 + \left(\frac{dU_{med}}{dU_{Cn}} \cdot u_{cU_{Cn}}\right)^2}$$

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot u_{cU_{an}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot u_{cU_{bn}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot u_{cU_{Cn}}\right)^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo

$$GL = \frac{u_c^4}{\frac{\left(\frac{dI_{med}}{dI_A} \cdot u_{cU_{an}}\right)^4}{gl_{U_{an}}} + \frac{\left(\frac{dI_{med}}{dI_B} \cdot u_{cU_{bn}}\right)^4}{gl_{U_{bn}}} + \frac{\left(\frac{dI_{med}}{dI_C} \cdot u_{cU_{Cn}}\right)^4}{gl_{U_{Cn}}}}$$

4. Obter o fator de Student para 95,45%
5. Expandir a incerteza

Potência Mecânica (Pm)

1. Obter a potência mecânica $Pm = 2 \cdot \pi \cdot Torque \cdot \frac{Rotação}{60}$
2. Obter a incerteza combinada

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{dPm}{dTorque} \cdot u_{cTorque}\right)^2 + \left(\frac{dPm}{dRotação} \cdot u_{cRotação}\right)^2}$$

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot Rotação}{60} \cdot u_{cTorque}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot Torque}{60} \cdot u_{cRotação}\right)^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo

$$GL = \frac{u_c^4}{\frac{\left(\frac{dPm}{dTorque} \cdot u_{cTorque}\right)^4}{gl_{Torque}} + \frac{\left(\frac{dPm}{dRoTação} \cdot u_{cRotação}\right)^4}{gl_{Rotação}}}$$

4. Obter o fator de Student para 95,45%
5. Expandir a incerteza

Escorregamento ($Slip$)

1. Obter o escorregamento $Slip = \frac{RotaçãoSíncrona - Rotação}{RotaçãoSíncrona} \cdot 100$

2. Obter a incerteza combinada

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{dSlip}{dRotação} \cdot u_{cRotação}\right)^2}$$

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{100}{1800} \cdot u_{cRotação}\right)^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo

$$GL = \frac{u_c^4}{\frac{\left(\frac{dSlip}{dRotação} \cdot u_{cRotação}\right)^4}{gl_{Rotação}}}$$

4. Obter o fator de Student para 95,45%
5. Expandir a incerteza

Resistência (R_{med})

1. Obter a média das Resistências $R_{med} = \frac{1}{3} \cdot (R_A + R_B + R_C)$
2. Obter a incerteza combinada

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{dR_{med}}{dR_A} \cdot u_{cR_A}\right)^2 + \left(\frac{dR_{med}}{dR_B} \cdot u_{cR_B}\right)^2 + \left(\frac{dR_{med}}{dR_C} \cdot u_{cR_C}\right)^2}$$

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{1}{3} \cdot u_{cR_A}\right)^2 + \left(\frac{1}{3} \cdot u_{cR_B}\right)^2 + \left(\frac{1}{3} \cdot u_{cR_C}\right)^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo

$$GL = \frac{u_c^4}{\frac{\left(\frac{dR_{med}}{dR_A} \cdot u_{cR_A}\right)^4}{gl_{R_A}} + \frac{\left(\frac{dR_{med}}{dR_B} \cdot u_{cR_B}\right)^4}{gl_{R_B}} + \frac{\left(\frac{dR_{med}}{dR_C} \cdot u_{cR_C}\right)^4}{gl_{R_C}}}$$

4. Obter o fator de Student
5. Expandir a incerteza

Separação de perdas

Correção da Resistência ($\boldsymbol{R_{corrigida}}$)

1. Obter a resistência corrigida $R_{corrigida} = R_{med} \cdot \left(\frac{\theta+K}{\theta_{amb}+K}\right)$
2. Obter a incerteza combinada

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{dR_{corrigida}}{dR_{med}} \cdot u_{c_{R_{med}}}\right)^2 + \left(\frac{dR_{corrigida}}{dT_{amb}} \cdot u_{c_{\theta_{amb}}}\right)^2}$$

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\theta + K}{\theta_{amb} + K} \cdot u_{c_{R_{med}}}\right)^2 + \left(\frac{-R_{med} \cdot (\theta + K)}{(\theta_{amb} + k)^2} \cdot u_{c_{\theta_{amb}}}\right)^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo

$$GL = \frac{u_c^4}{\frac{\left(\frac{dR_{corrigida}}{dR_{med}} \cdot u_{c_{R_{med}}}\right)^4}{gl_{R_{med}}} + \frac{\left(\frac{dR_{corrigida}}{d\theta_{amb}} \cdot u_{c_{\theta_{amb}}}\right)^4}{gl_{\theta_{amb}}}}$$

4. Obter o fator de Student
5. Expandir a incerteza

Correção do Escorregamento

1. Obter a resistência corrigida $S_{corrigido} = S \cdot \left(\frac{\theta+K}{\theta_{amb}+K}\right)$
2. Obter a incerteza combinada

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{dS_{corrigido}}{dS} \cdot u_{c_S}\right)^2 + \left(\frac{dS_{corrigido}}{d\theta_{amb}} \cdot u_{c_{\theta_{amb}}}\right)^2}$$

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\theta + K}{\theta_{amb} + K} \cdot u_{c_S}\right)^2 + \left(\frac{-S * (\theta + K)}{(\theta_{amb} + k)^2} \cdot u_{c_{\theta_{amb}}}\right)^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo

$$GL = \frac{u_c^4}{\frac{\left(\frac{dS_{corrigido}}{dS} \cdot u_{c_S}\right)^4}{gl_S} + \frac{\left(\frac{dS_{corrigido}}{d\theta_{amb}} \cdot u_{c_{\theta_{amb}}}\right)^4}{gl_{\theta_{amb}}}}$$

6. Obter o fator de Student para 95,45%.
7. Expandir a incerteza

Perdas Joule no Estator

1. Obter a perda Joule no estator $P_{joule\ estator} = I_{carga}^2 \cdot R_{corrigido}$
2. Obter a incerteza combinada

$$uc = \sqrt{\left(\frac{dP_{joule\ estator}}{dI_{carga}} \cdot uc_{I_{carga}}\right)^2 + \left(\frac{dP_{joule\ estator}}{dR_{corrigida}} \cdot u_{c_{Rcorrido}}\right)^2}$$

$$uc = \sqrt{\left(2 \cdot I_{carga} \cdot R_{corrigida} \cdot uc_{I_{carga}}\right)^2 + \left(I_{carga}^2 \cdot u_{c_{Rcorrido}}\right)^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo

$$GL = \frac{u_c^4}{\frac{\left(\frac{dP_{joule\ estator}}{dI_{carga}} \cdot uc_{I_{carga}}\right)^4}{gl_{I_{carga}}} + \frac{\left(\frac{dP_{joule\ estator}}{dR_{corrigida}} \cdot u_{c_{Rcorrido}}\right)^4}{gl_{R_{corrigido}}}}$$

4. Obter o fator de Student para 95,45%.
5. Expandir a incerteza

Perdas por Atrito e Ventilação

1. Obter graficamente. Grafico $U^2 vsPe - R_{corrigido} I_{vazio}^2$ utilizando os dados do ensaio de rotor livre. ($R_{corrigido} I_{vazio}^2$ para cada ponto)
2. Pelo software *Table Curve* obter uc e a incerteza expandida

Perdas no núcleo

1. Obter as perdas no núcleo

$$P_{nucleo} = P_{eletrica\ a\ vazio} - P_{atrito\ e\ ventilacao} - R_{corigida} \cdot I_{vazio}^2$$

2. Obter a incerteza combinada

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{dP_{nucleo}}{dP_{eletrica\ vazio}} \cdot uc_{Pevaz}\right)^2 + \left(\frac{dP_{nucleo}}{dP_{at\ e\ vent}} \cdot u_{c_{Pat\ e\ vent}}\right)^2 + \left(\frac{dP_{nucleo}}{dR_{corigida}} \cdot u_{c_{R_{corr}}}\right)^2 + \left(\frac{dP_{nucleo}}{dI_{vazio}} \cdot u_{c_{I_{vazio}}}\right)^2}$$

$$u_c = \sqrt{(1 \cdot uc_{Pevazio})^2 + \left(-1 \cdot u_{c_{Pat\ e\ vent}}\right)^2 + \left(-\,I_{vazio}^2 \cdot u_{c_{R_{corr}}}\right)^2 + \left(-2 \cdot R_{corr} \cdot I_{vazio} \cdot u_{c_{vazio}}\right)^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo

$$GL = \frac{u_c^4}{\frac{\left(\frac{dP_{nucleo}}{dP_{eletrica\ vazio}} \cdot uc_{Pevazio}\right)^4}{gl_{Pe\ vazio}} + \frac{\left(\frac{dP_{nucleo}}{dP_{at\ e\ vent}} \cdot u_{c_{Pat\ e\ vent}}\right)^4}{gl_{P_{at\ e\ vent}}} + \frac{\left(\frac{dP_{nucleo}}{dR_{corigida}} \cdot u_{c_{R_{corr}}}\right)^4}{gl_{R_{corr}}} + \frac{\left(\frac{dP_{nucleo}}{dI_{vazio}} \cdot u_{c_{I_{vazio}}}\right)^4}{gl_{I_{vazio}}}}$$

4. Obter o fator de Student para 95,45%.
5. Expandir a incerteza

Perdas Joule no Rotor

1. Obter a perda Joule no rotor

$$P_{joule\ rotor} = \left(P_{eletrica} - P_{joule\ estator} - P_{nucleo}\right) \cdot S_{corrigido}$$

2. Obter a incerteza combinada

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{dP_{joule\ rotor}}{dP_{eletrica}} \cdot u_{c_{Pe}}\right)^2 + \left(\frac{dP_{joule\ rotor}}{dP_{joule\ estator}} \cdot u_{c_{PJEstator}}\right)^2 + \left(\frac{dP_{joule\ rotor}}{dP_{nucleo}} \cdot u_{c_{Pnuc}}\right)^2 + \left(\frac{dP_{joule\ rotor}}{dS_{corrigido}} \cdot u_{c_{S_{corrigido}}}\right)^2}$$

$$u_c = \sqrt{\left(S_{corrigido} \cdot u_{c_{Pe}}\right)^2 + \left(-S_{corrigido} \cdot u_{c_{PJEstator}}\right)^2 + \left(-S_{corrigido} \cdot u_{c_{Pnuc}}\right)^2 + \left(\left(Pe - P_{Jestator} - P_{nucleo}\right) \cdot u_{c_{Scorrigido}}\right)^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo

$$GL = \frac{u_c^4}{\frac{\left(\frac{dP_{joule\ rotor}}{dP_{eletrica}} \cdot u_{c_{Pe}}\right)^4}{gl_{Pe}} + \frac{\left(\frac{dP_{joule\ rotor}}{dP_{joule\ estator}} \cdot u_{c_{PJEstator}}\right)^4}{gl_{PJEstator}} + \frac{\left(\frac{dP_{joule\ rotor}}{dP_{nucleo}} \cdot u_{c_{Pnuc}}\right)^4}{gl_{Pnuc}} + \frac{\left(\frac{dP_{joule\ rotor}}{dS_{corrigido}} \cdot u_{c_{S_{corrigido}}}\right)^4}{gl_{Scorrigido}}}$$

4. Obter o fator de Student para 95,45%
5. Expandir a incerteza

Perdas por dispersão

1. Obter as perdas por dispersão

$$P_{dispersao} = P_{eletrica} - P_{mecanica} - P_{joule\ estator} - P_{joule\ rotor} - P_{nucleo} - P_{atrito\ e\ vent}$$

2. Obter a incerteza combinada

$$u_c = \sqrt{u_{c_{Pe}}^2 + u_{c_{Pm}}^2 + u_{c_{Pjest}}^2 + u_{c_{Pjrotor}}^2 + u_{c_{Pnuc}}^2 + u_c P_{at}^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo

$$GL = \frac{u_c^4}{\frac{u_{c_{Pe}}^4}{gl_{Pe}} + \frac{u_{c_{Pm}}^4}{gl_{Pm}} + \frac{u_{c_{Pjest}}^2}{gl_{Pjest}} + \frac{u_{c_{Pjrotor}}^4}{gl_{Pjrotor}} + \frac{u_{c_{Pnuc}}^4}{gl_{Pnuc}} + \frac{u_c P_{at}^4}{gl_{Pat}}}$$

4. Obter o fator de Student para 95,45%
5. Expandir a incerteza

O processo deve ser realizador para 100%, 75% e 50% de carga.

Perdas por dispersão corrigidas

1. Plotar no software *Table Curve* $\mathrm{Torque}^2 \mathrm{vs} \mathrm{P}_{\mathrm{add}}$ (linear)
2. Se o coeficiente de correlação for menor que 0,9 descartar o ensaio
3. Pelo software obter a incerteza combinada do coeficiente da reta
4. Incerteza combinada da Perda por dispersão corrigida $\mathrm{P}_{\mathrm{addcorrigida}} = \mathrm{Torque}^2 \cdot a$

Onde

a = Coeficiente da reta $Torque^2 vsP_{add}$

$$\mathrm{u_c} = \sqrt{\left(\frac{\mathrm{dP_{addcorrigida}}}{\mathrm{dTorque^2}} \cdot \mathrm{u_{cTorque^2}}\right)^2 + \left(\frac{\mathrm{dP_{addcorrigida}}}{\mathrm{da}} \cdot \mathrm{u_{ca}}\right)^2}$$

$$\mathrm{u_c} = \sqrt{\left(\mathrm{a} \cdot \mathrm{u_{cTorque}}\right)^2 + \left(\mathrm{Torque^2} \cdot \mathrm{u_{ca}}\right)^2}$$

5. Obter o grau de liberdade efetivo

$$\mathrm{GL} = \frac{\mathrm{u_c^4}}{\frac{\left(\frac{\mathrm{dP_{addcorrigida}}}{\mathrm{dTorque}} \cdot \mathrm{u_{cTorque^2}}\right)^4}{\mathrm{gl_{Torque}}} + \frac{\left(\frac{\mathrm{dP_{addcorrigida}}}{\mathrm{da}} \cdot \mathrm{u_{ca}}\right)^4}{\mathrm{gl_a}}}$$

6. Obter o fator de Student
7. Expandir a incerteza
8. Repetir o processo para 100%,75% e 50%

Rendimento

1. Obter o rendimento

$$\eta = \frac{\mathrm{Pe} - \sum \mathrm{Perdas}}{\mathrm{Pe}}$$

$$\eta = \frac{Pe - P_{Joule_{Estator}} - P_{Joule_{Rotor}} - P_{nucleo} - P_{at\ e\ vent} - P_{add_{cor}}}{Pe}$$

$$\eta = 1 - \frac{P_{Joule_{Estator}} + P_{Joule_{Rotor}} + P_{nucleo} + P_{at\ e\ vent} + P_{add_{cor}}}{Pe}$$

2. Obter a incerteza combinada

$$uc = \sqrt{\left(\frac{d\eta}{dPe} \cdot u_{cPe}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{dP_{Jest}} \cdot u_{cP_{Jest}}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{dP_{JRot}} \cdot u_{cP_{JRot}}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{dP_N} \cdot u_{cP_N}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{dP_{atvent}} \cdot u_{cP_{atvent}}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{dP_{addcor}} \cdot u_{cP_{addcor}}\right)^2}$$

$$uc = \sqrt{\left(\frac{P_{Jest} + P_{Jrot} + P_n + P_{atvent} + P_{addcor}}{Pe^2} \cdot u_{cPe}\right)^2 + \left(\frac{1}{Pe} \cdot u_{cP_{Jest}}\right)^2 + \left(\frac{1}{Pe} \cdot u_{cP_{JRot}}\right)^2 + \left(\frac{1}{Pe} \cdot u_{cP_N}\right)^2 + \left(\frac{1}{Pe} \cdot u_{cP_{atvent}}\right)^2 + \left(\frac{1}{Pe} \cdot u_{cP_{addcor}}\right)^2}$$

3. Obter o grau de liberdade efetivo.

$$GL = \frac{u_c^4}{\frac{\left(\frac{d\eta}{dPe} \cdot u_{cPe}\right)^4}{gl_{Pe}} + \frac{\left(\frac{d\eta}{dP_{Jest}} \cdot u_{cP_{Jest}}\right)^4}{gl_{Pjest}} + \frac{\left(\frac{d\eta}{dP_{JRot}} \cdot u_{cP_{JRot}}\right)^4}{gl_{PjRot}} + \frac{\left(\frac{d\eta}{dP_N} \cdot u_{cP_N}\right)^4}{gl_{Pn}} + \frac{\left(\frac{d\eta}{dP_{atvent}} \cdot u_{cP_{atvent}}\right)^4}{gl_{Patvent}} + \frac{\left(\frac{d\eta}{dP_{addcor}} \cdot u_{cP_{addcor}}\right)^4}{gl_{Paddcor}}}$$

4. Obter o fator de Student
5. Expandir a incerteza
6. Repetir o processo para 100%,75% e 50%

Anexo 2 – Medições nos motores

Motor convencional Metal Corte de 1 cv

Tabela A.1 – Motor convencional de 1 cv com 100% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1746	3,978	2,86	2,91	2,84	2,87	127,7	129,3	128,1	222,3	0,9203
1744	4,025	2,88	2,93	2,87	2,89	127,8	129,4	128,1	222,4	0,9298
1745	4,039	2,89	2,93	2,85	2,89	127,8	129,3	128,1	222,4	0,9292
1746	4,026	2,88	2,91	2,86	2,88	127,9	129,5	128,3	222,7	0,9273
1745	3,967	2,87	2,91	2,85	2,88	127,8	129,3	128,3	222,5	0,9227
1745	3,997	2,87	2,90	2,86	2,88	127,7	129,3	128,3	222,4	0,9249
1746	3,986	2,87	2,90	2,85	2,87	127,8	129,3	128,4	222,5	0,9210
1747	3,995	2,88	2,91	2,88	2,89	128,0	129,7	128,7	223,1	0,9335
1747	4,078	2,87	2,90	2,87	2,88	128,1	129,7	128,7	223,1	0,9244
1746	3,988	2,86	2,90	2,86	2,87	128,0	129,6	128,7	223,0	0,9227
1745	4,071	2,87	2,91	2,87	2,88	128,0	129,3	128,5	222,7	0,9265

Tabela A.2 – Motor convencional de 1 cv com 75% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1763	2,864	2,39	2,43	2,37	2,40	126,7	128,3	127,1	220,6	0,6936
1761	2,883	2,39	2,43	2,38	2,40	126,6	128,0	126,9	220,2	0,6998
1761	2,873	2,39	2,42	2,35	2,38	126,3	127,8	126,5	219,7	0,6944
1761	2,866	2,40	2,42	2,34	2,39	126,4	127,8	126,6	219,9	0,6955
1762	2,847	2,39	2,42	2,35	2,39	126,6	127,9	126,7	220,1	0,6926
1761	2,867	2,39	2,42	2,35	2,39	126,6	127,9	126,7	220,1	0,6953
1761	2,925	2,40	2,43	2,35	2,39	126,7	127,8	126,7	220,1	0,6979
1762	2,862	2,40	2,41	2,35	2,39	126,7	128,1	126,8	220,3	0,6945
1761	2,885	2,40	2,43	2,36	2,40	126,7	128,0	126,7	220,2	0,6977
1761	2,906	2,40	2,43	2,35	2,40	126,6	128,2	126,8	220,3	0,6981

Tabela A.3 – Motor convencional de 1 cv com 50% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1773	2,012	1,96	2,02	1,97	1,98	126,3	127,8	126,7	219,9	0,4904
1774	2,017	1,96	2,03	1,96	1,98	126,3	127,8	126,7	219,8	0,4886
1773	2,001	1,96	2,02	1,97	1,98	126,1	127,6	126,5	219,5	0,4900
1775	2,017	1,95	2,02	1,98	1,98	126,2	127,9	126,7	219,9	0,4868
1774	2,018	1,96	2,02	1,98	1,99	126,2	127,6	126,6	219,6	0,4907
1774	2,007	1,95	2,01	1,99	1,98	126,2	127,8	126,7	219,8	0,4853
1774	1,990	1,95	2,01	1,98	1,98	126,2	127,7	126,6	219,6	0,4875
1774	2,046	1,94	2,02	1,98	1,98	125,9	127,5	126,4	219,3	0,4904
1774	2,028	1,94	2,01	1,99	1,98	125,8	127,5	126,5	219,3	0,4860
1774	1,881	1,95	2,02	1,98	1,98	125,8	127,3	126,4	219,1	0,4845

Tabela A.4 – Motor convencional de 1 cv com rotor livre

IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
2,18	2,15	2,07	2,13	144,8	144,3	144,2	249,9	0,1993
2,16	2,15	2,10	2,14	144,8	144,5	144,3	250,2	0,2007
2,16	2,15	2,10	2,13	144,6	144,3	144,3	249,9	0,1988
2,16	2,14	2,06	2,12	144,5	144,1	144,0	249,5	0,1953
2,15	2,12	2,07	2,11	144,4	144,1	144,1	249,5	0,1939
1,72	1,63	1,60	1,65	127,5	127,4	126,8	220,4	0,1354
1,67	1,64	1,60	1,64	127,3	127,3	126,7	220,1	0,1359
1,68	1,64	1,60	1,64	127,2	127,1	126,6	219,9	0,1355
1,67	1,64	1,60	1,63	127,3	127,2	126,7	220,1	0,1348
1,67	1,64	1,61	1,64	127,3	127,2	126,7	220,1	0,1335
1,68	1,63	1,61	1,64	127,1	127,0	126,5	219,7	0,1343
1,66	1,63	1,60	1,63	127,2	127,2	126,7	220,0	0,1378
1,67	1,64	1,60	1,64	127,5	127,5	126,9	220,4	0,1382
1,67	1,63	1,60	1,63	127,3	127,3	126,7	220,2	0,1355
1,67	1,63	1,60	1,63	127,5	127,3	126,7	220,3	0,1337
1,45	1,43	1,38	1,42	116,3	115,9	114,9	200,3	0,1087

1,46	1,43	1,39	1,43	116,4	116,0	114,9	200,3	0,1075
1,46	1,42	1,37	1,42	116,4	115,8	114,8	200,2	0,1053
1,45	1,43	1,37	1,42	116,3	115,7	114,8	200,1	0,1070
1,44	1,43	1,38	1,42	116,3	115,8	114,9	200,2	0,1087
1,04	1,00	1,01	1,01	88,2	87,8	87,1	149,7	0,0592
1,03	1,00	1,02	1,01	88,2	87,7	87,0	149,7	0,0607
1,03	0,99	1,01	1,01	88,1	87,7	87,1	149,6	0,0611
1,05	1,00	1,01	1,02	88,2	87,8	87,0	149,7	0,0611
1,04	1,00	1,00	1,01	88,2	87,8	87,1	149,8	0,0621
0,78	0,71	0,79	0,76	68,9	66,9	67,0	110,4	0,0388
0,77	0,71	0,80	0,76	68,9	66,9	67,0	110,5	0,0388
0,77	0,72	0,79	0,76	68,9	66,9	67,0	110,4	0,0395
0,78	0,72	0,80	0,76	69,0	67,0	67,1	110,6	0,0395
0,78	0,71	0,79	0,76	69,0	67,1	67,2	110,7	0,0396
0,58	0,55	0,66	0,60	55,8	54,0	53,9	79,9	0,0271
0,57	0,54	0,67	0,60	55,8	53,9	53,9	79,9	0,0285
0,57	0,55	0,67	0,60	55,7	53,9	53,8	79,8	0,0287
0,57	0,55	0,67	0,60	55,7	53,9	53,8	79,9	0,0275
0,58	0,54	0,65	0,59	55,7	53,9	53,7	79,9	0,0271
0,44	0,44	0,54	0,47	46,8	45,5	44,6	50,6	0,0203
0,45	0,43	0,53	0,47	46,9	45,5	44,6	50,7	0,0198
0,44	0,43	0,54	0,47	47,0	45,7	44,8	50,7	0,0209
0,44	0,43	0,55	0,48	46,9	45,6	44,7	50,7	0,0204
0,44	0,43	0,54	0,47	46,8	45,6	44,6	50,7	0,0201
0,38	0,42	0,53	0,44	43,9	43,5	42,8	35,5	0,0175
0,39	0,42	0,55	0,45	44,0	43,5	42,9	35,5	0,0183
0,39	0,42	0,53	0,45	44,0	43,5	42,9	35,5	0,0179
0,39	0,42	0,54	0,45	44,0	43,5	42,8	35,5	0,0185
0,39	0,42	0,54	0,45	43,8	43,4	42,7	35,5	0,0177
0,41	0,44	0,56	0,47	43,4	43,0	42,4	29,9	0,0175
0,40	0,43	0,56	0,46	43,4	43,1	42,4	30,0	0,0169
0,39	0,43	0,55	0,46	43,6	43,2	42,5	30,0	0,0164
0,41	0,43	0,54	0,46	43,4	43,1	42,4	29,9	0,0173
0,40	0,43	0,56	0,46	43,4	43,1	42,4	30,0	0,0174

Motor alto rendimento Metal Corte de 1 cv

Tabela A.5 – Motor alto rendimento de 1 cv com 100% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1746	4,002	3,13	3,04	3,15	3,11	130,6	130,5	130,6	226,2	0,9611
1745	3,842	3,14	3,05	3,13	3,11	130,6	130,7	130,7	226,4	0,9614
1744	3,933	3,12	3,04	3,14	3,10	130,5	130,4	130,5	226,0	0,9574
1744	3,937	3,13	3,04	3,14	3,10	130,6	130,5	130,6	226,1	0,9566
1746	4,010	3,13	3,03	3,12	3,09	130,6	130,6	130,7	226,2	0,9570
1744	3,994	3,13	3,05	3,12	3,10	130,7	130,5	130,6	226,2	0,9551
1744	3,983	3,13	3,04	3,13	3,10	130,6	130,4	130,4	226,0	0,9572
1744	3,915	3,14	3,03	3,13	3,10	130,6	130,3	130,4	225,9	0,9541
1746	3,991	3,13	3,05	3,13	3,10	130,6	130,6	130,5	226,2	0,9608
1745	3,967	3,13	3,05	3,13	3,10	130,7	130,6	130,5	226,2	0,9552
1746	3,956	3,14	3,05	3,13	3,10	130,7	130,7	130,6	226,3	0,9584
1746	3,971	3,13	3,04	3,11	3,09	130,7	130,9	130,7	226,5	0,9559

Tabela A.6 – Motor alto rendimento de 1 cv com 75% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1763	2,990	2,66	2,61	2,69	2,65	130,1	130,4	130,5	225,8	0,7284
1766	3,040	2,67	2,61	2,69	2,65	130,2	130,5	130,6	225,9	0,7311
1764	3,057	2,66	2,60	2,68	2,65	130,2	130,5	130,6	225,9	0,7308
1762	2,943	2,66	2,61	2,67	2,65	130,1	130,3	130,4	225,7	0,7285
1762	3,024	2,65	2,61	2,67	2,64	130,0	130,1	130,2	225,4	0,7243
1763	3,066	2,66	2,60	2,68	2,65	130,1	130,2	130,2	225,5	0,7276
1763	3,019	2,67	2,61	2,67	2,65	130,1	130,4	130,3	225,6	0,7306
1762	2,956	2,66	2,61	2,67	2,65	130,2	130,3	130,3	225,6	0,7263
1762	3,019	2,67	2,61	2,68	2,65	130,1	130,3	130,2	225,5	0,7296
1761	3,061	2,67	2,61	2,67	2,65	130,0	130,2	130,2	225,4	0,7286
1762	3,037	2,65	2,60	2,67	2,64	129,7	130,0	129,9	225,0	0,7251

Tabela A.7 – Motor alto rendimento de 1 cv com 50% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1777	1,948	2,30	2,25	2,30	2,28	130,3	130,5	130,3	225,8	0,5054
1778	1,958	2,29	2,26	2,31	2,29	130,2	130,5	130,3	225,7	0,5036
1777	1,998	2,30	2,26	2,31	2,29	130,3	130,5	130,4	225,9	0,5046
1778	2,186	2,30	2,25	2,30	2,28	130,1	130,4	130,3	225,7	0,508
1777	2,060	2,29	2,26	2,30	2,28	130,2	130,4	130,3	225,7	0,5024
1778	2,068	2,28	2,25	2,29	2,27	130,0	130,3	130,2	225,4	0,5000
1777	1,958	2,28	2,26	2,32	2,29	130,0	130,3	130,1	225,4	0,4997
1777	2,076	2,28	2,26	2,30	2,28	130,0	130,1	130,1	225,3	0,5019
1778	2,129	2,30	2,25	2,30	2,28	130,0	130,2	130,1	225,4	0,5064
1777	2,017	2,28	2,25	2,32	2,28	129,8	130,2	130,0	225,1	0,5045

Tabela A.8 – Motor alto rendimento de 1 cv com rotor livre

IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
2,39	2,41	2,54	2,45	143,9	144,3	144,3	249,5	0,1843
2,37	2,41	2,54	2,44	143,9	144,2	144,2	249,4	0,1806
2,37	2,42	2,55	2,45	144,0	144,2	144,3	249,5	0,1795
2,38	2,42	2,52	2,44	144,0	144,3	144,2	249,5	0,1839
2,38	2,42	2,55	2,45	143,9	144,2	144,2	249,4	0,1805
1,80	1,88	2,00	1,89	126,1	127,0	127,2	219,5	0,1211
1,79	1,88	2,00	1,89	126,1	126,9	127,4	219,6	0,1186
1,80	1,88	2,00	1,89	126,2	127,0	127,4	219,8	0,1225
1,80	1,88	1,99	1,89	126,1	126,9	127,2	219,5	0,1261
1,80	1,88	1,97	1,88	126,3	127,0	127,3	219,7	0,1276
1,81	1,88	1,99	1,89	126,2	127,1	127,4	219,8	0,1253
1,80	1,88	1,96	1,88	126,1	126,8	127,2	219,5	0,1269
1,81	1,89	1,98	1,89	126,1	127,0	127,3	219,7	0,1232
1,79	1,88	1,98	1,88	126,2	127,0	127,3	219,7	0,1255
1,80	1,87	2,00	1,89	126,1	126,9	127,3	219,6	0,1236
1,54	1,60	1,71	1,62	114,3	115,5	116,0	199,5	0,1005
1,54	1,61	1,71	1,62	114,4	115,6	116,1	199,6	0,0982

1,53	1,59	1,68	1,60	114,1	115,3	115,7	199,1	0,0997
1,53	1,59	1,69	1,60	114,0	115,1	115,6	198,9	0,0999
1,53	1,60	1,69	1,60	114,1	115,2	115,6	199,0	0,1008
1,05	1,08	1,21	1,11	87,3	87,8	88,4	150,0	0,0650
1,06	1,08	1,20	1,11	87,3	88,0	88,4	150,1	0,0643
1,06	1,07	1,20	1,11	87,2	87,9	88,4	150,0	0,0645
1,05	1,06	1,20	1,11	87,3	87,9	88,5	150,1	0,0641
1,06	1,08	1,21	1,12	87,4	88,1	88,6	150,3	0,0639
0,75	0,74	0,92	0,80	66,9	66,7	68,8	109,9	0,0478
0,75	0,73	0,93	0,80	66,9	66,7	68,9	109,9	0,0477
0,75	0,74	0,92	0,80	66,9	66,7	68,9	109,9	0,0466
0,74	0,73	0,91	0,79	67,0	66,8	69,0	110,0	0,0465
0,74	0,74	0,93	0,80	67,0	66,8	69,1	110,1	0,0455
0,58	0,55	0,77	0,63	54,2	53,7	56,3	80,6	0,0373
0,59	0,55	0,77	0,64	54,2	53,6	56,4	80,6	0,0374
0,58	0,55	0,78	0,64	54,2	53,7	56,3	80,6	0,0375
0,59	0,55	0,78	0,64	54,2	53,6	56,3	80,6	0,0381
0,58	0,55	0,79	0,64	54,1	53,6	56,3	80,5	0,0368
0,51	0,49	0,70	0,57	47,3	47,3	49,0	59,5	0,0328
0,51	0,49	0,70	0,57	47,3	47,3	49,0	59,5	0,0337
0,50	0,49	0,72	0,57	47,3	47,3	49,0	59,5	0,0328
0,50	0,49	0,71	0,57	47,3	47,3	49,0	59,5	0,0322
0,50	0,49	0,69	0,56	47,2	47,2	48,9	59,5	0,0327
0,51	0,49	0,70	0,57	45,1	45,0	46,4	49,9	0,0318
0,51	0,05	0,69	0,56	45,1	45,0	46,4	49,9	0,0324
0,52	0,49	0,69	0,57	45,1	44,9	46,4	49,9	0,0316
0,52	0,50	0,69	0,57	45,1	44,9	46,4	49,9	0,0324
0,51	0,50	0,69	0,57	45,0	44,9	46,4	49,8	0,0320
0,51	0,49	0,70	0,57	45,1	45,0	46,4	49,9	0,0318
0,51	0,50	0,69	0,56	45,1	45,0	46,4	49,9	0,0324
0,52	0,49	0,69	0,57	45,1	44,9	46,4	49,9	0,0316
0,52	0,50	0,69	0,57	45,1	44,9	46,4	49,9	0,0324
0,51	0,50	0,69	0,57	45,0	44,9	46,4	49,8	0,0320

Motor Metal corte de 2 cv

Tabela A.9 – Motor de 2 cv com 100% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1729	8,144	5,57	5,62	5,64	5,61	127,8	128,3	127,7	221,6	1,7392
1730	7,960	5,58	5,63	5,65	5,62	128,0	128,6	128,0	222,0	1,7474
1730	8,118	5,59	5,63	5,64	5,62	128,0	128,5	127,9	221,9	1,7434
1729	8,101	5,57	5,63	5,63	5,61	127,8	128,3	127,7	221,5	1,7389
1726	8,078	5,59	5,65	5,67	5,64	127,6	128,1	127,6	221,2	1,7502
1727	8,070	5,58	5,64	5,65	5,62	127,5	127,9	127,4	221,0	1,7425
1729	8,077	5,56	5,63	5,62	5,60	127,6	128,0	127,4	221,1	1,7320
1728	8,089	5,61	5,66	5,71	5,66	127,7	128,3	127,8	221,6	1,7615
1729	8,086	5,57	5,65	5,66	5,63	127,6	128,2	127,6	221,4	1,7479
1729	8,145	5,56	5,66	5,65	5,62	127,5	128,3	127,7	221,4	1,7453
1729	8,049	5,6	5,65	5,66	5,64	127,6	128,2	127,5	221,3	1,7515
1728	8,103	5,57	5,64	5,65	5,62	127,6	128,2	127,6	221,4	1,7440

Tabela A.10 – Motor de 2 cv com 75% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1752	6,065	4,53	4,62	4,59	4,58	127,9	128,5	127,8	221,8	1,2747
1752	6,073	4,51	4,6	4,57	4,56	127,7	128,4	127,7	221,6	1,2670
1752	6,093	4,51	4,61	4,57	4,56	127,9	128,5	127,8	221,8	1,2683
1752	6,066	4,50	4,61	4,56	4,56	127,8	128,6	127,7	221,8	1,2664
1751	6,070	4,54	4,62	4,59	4,58	127,9	128,7	127,8	221,9	1,2823
1754	5,908	4,45	4,56	4,53	4,51	128,0	128,5	128,0	222,0	1,2418
1755	5,912	4,43	4,53	4,52	4,49	128,0	128,8	128,0	222,2	1,2306
1755	5,914	4,43	4,53	4,51	4,49	128,1	128,9	128,1	222,3	1,2319
1756	5,919	4,43	4,54	4,52	4,50	128,1	129,2	128,2	222,6	1,2346
1754	6,054	4,49	4,59	4,58	4,55	128,1	128,8	128,0	222,2	1,2615
1752	6,061	4,51	4,62	4,59	4,58	128,0	128,8	128,1	222,2	1,2714
1752	6,041	4,49	4,61	4,59	4,56	128,2	128,7	128,1	222,3	1,2675

Tabela A.11 – Motor de 2 cv com 50% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1770	3,938	3,70	3,82	3,80	3,77	128,3	128,8	128,3	222,5	0,8562
1771	3,867	3,69	3,82	3,80	3,77	128,3	128,8	128,3	222,5	0,8379
1771	4,099	3,71	3,80	3,79	3,76	128,3	128,8	128,3	222,5	0,8416
1772	3,957	3,73	3,77	3,79	3,76	128,4	129,0	128,3	222,6	0,8417
1771	4,035	3,70	3,81	3,79	3,77	128,3	128,8	128,2	222,4	0,8397
1770	3,924	3,70	3,82	3,81	3,78	128,2	128,9	128,2	222,5	0,8455
1770	3,937	3,71	3,80	3,81	3,77	128,3	128,9	128,3	222,5	0,8480
1773	4,093	3,68	3,75	3,79	3,74	128,0	128,7	128,1	222,2	0,8185
1771	3,950	3,71	3,77	3,79	3,76	128,1	128,7	128,1	222,2	0,8429
1771	3,985	3,72	3,78	3,80	3,77	128,0	128,4	128,0	222,0	0,8540
1770	3,963	3,72	3,82	3,80	3,78	128,2	128,8	128,2	222,4	0,8517
1770	3,958	3,70	3,80	3,79	3,76	127,6	128,2	127,6	221,3	0,8526
1772	3,983	3,70	3,75	3,77	3,74	127,5	128,1	127,6	221,2	0,8386
1772	4,026	3,67	3,74	3,77	3,73	127,4	127,9	127,3	220,9	0,8316
1772	3,912	3,64	3,75	3,73	3,71	127,7	128,5	127,8	221,7	0,8216

Tabela A.12 – Motor de 2 cv com rotor livre

IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
4,12	4,15	4,18	4,15	144,1	145,1	143,4	249,5	0,2845
4,11	4,14	4,17	4,14	144,0	144,9	143,3	249,2	0,2875
4,13	4,14	4,17	4,15	144,2	145,0	143,4	249,5	0,2851
4,13	4,15	4,20	4,16	144,1	145,0	143,5	249,5	0,2805
4,13	4,15	4,18	4,15	144,2	145,0	143,4	249,5	0,2831
3,03	3,04	3,06	3,04	126,7	127,5	127,1	220,1	0,1862
3,02	3,04	3,06	3,04	126,7	127,5	127,1	220,1	0,1836
3,03	3,03	3,07	3,04	126,7	127,4	127,0	220,0	0,1848
3,01	3,03	3,07	3,03	126,4	127,1	126,8	219,6	0,1889
3,01	3,02	3,07	3,04	126,4	127,0	126,7	219,5	0,1863
3,00	3,03	3,05	3,03	126,4	127,0	126,7	219,4	0,1829

3,02	3,03	3,06	3,04	126,5	127,0	126,7	219,5	0,1843
3,01	3,03	3,05	3,03	126,4	127,1	126,7	219,5	0,1814
3,01	3,02	3,04	3,02	126,4	127,0	126,7	219,4	0,1825
3,02	3,04	3,05	3,04	126,7	127,3	126,9	219,9	0,1859
2,22	2,27	2,27	2,26	103,1	105,0	104,9	180,2	0,1210
2,23	2,27	2,28	2,26	103,3	105,3	105,1	180,5	0,1184
2,22	2,28	2,26	2,25	103,2	105,2	105,1	180,4	0,1192
2,22	2,28	2,28	2,26	103,3	105,3	105,2	180,6	0,1192
2,22	2,28	2,27	2,26	103,3	105,3	105,2	180,5	0,1203
1,67	1,70	1,72	1,70	82,0	82,6	82,4	139,7	0,0784
1,67	1,71	1,72	1,70	82,0	82,7	82,4	139,7	0,0805
1,68	1,70	1,72	1,70	82,1	82,8	82,4	139,8	0,0803
1,68	1,70	1,71	1,70	82,0	82,7	82,4	139,7	0,0783
1,67	1,70	1,72	1,70	82,1	82,8	82,4	139,9	0,0812
1,22	1,24	1,23	1,23	62,6	64,3	61,6	99,5	0,0556
1,22	1,23	1,22	1,22	62,4	64,2	61,6	99,4	0,0537
1,22	1,23	1,24	1,23	62,5	64,2	61,6	99,5	0,0538
1,21	1,24	1,24	1,23	62,4	64,2	61,6	99,4	0,0553
1,20	1,24	1,24	1,23	62,3	64,1	61,5	99,3	0,0553
0,90	0,94	0,95	0,93	50,5	52,5	50,5	69,7	0,0401
0,91	0,95	0,96	0,94	50,5	52,5	50,4	69,7	0,0422
0,90	0,95	0,97	0,94	50,6	52,5	50,4	69,7	0,0435
0,91	0,95	0,97	0,94	50,5	52,5	50,4	69,7	0,0426
0,90	0,94	0,96	0,93	50,5	52,5	50,4	69,7	0,0421
0,75	0,82	0,85	0,81	44,5	46,9	45,5	50,2	0,0374
0,75	0,84	0,85	0,81	44,5	46,9	45,5	50,2	0,0371
0,74	0,83	0,86	0,81	44,5	46,9	45,5	50,2	0,0370
0,72	0,81	0,84	0,79	44,5	46,9	45,6	50,3	0,0342

Motor alto rendimento WEG de 3 cv

Tabela A.13 – Motor alto rendimento de 3 cv com 100% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1714	12,561	8,99	8,82	8,97	8,93	130,7	131,0	130,6	226,5	2,7779
1714	12,599	9,02	8,93	8,98	8,98	130,8	130,9	130,7	226,6	2,7884
1714	12,484	8,96	8,85	8,98	8,93	130,6	130,7	130,7	226,3	2,7558
1714	12,323	8,86	8,76	8,92	8,85	130,6	130,7	130,6	226,3	2,6926
1714	12,366	8,89	8,74	8,93	8,85	130,7	130,8	130,7	226,4	2,7082
1713	12,517	8,95	8,81	8,97	8,91	130,6	130,7	130,5	226,2	2,7558
1714	12,287	8,86	8,71	8,96	8,84	130,6	130,9	130,7	226,4	2,7160
1715	12,372	8,88	8,75	8,96	8,86	130,8	130,9	130,8	226,6	2,7231
1714	12,499	8,95	8,75	9,00	8,90	130,9	131,1	131,0	226,9	2,7677
1715	12,292	8,86	8,70	8,95	8,84	130,8	131,1	131,0	226,8	2,7136

Tabela A.14 – Motor alto rendimento de 3 cv com 75% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1746	9,132	7,51	7,37	7,42	7,44	131,0	131,1	131,0	226,9	2,0180
1748	8,896	7,42	7,32	7,39	7,38	131,1	131,3	131,1	227,2	1,9211
1748	8,788	7,37	7,21	7,39	7,32	131,1	131,4	131,2	227,3	1,8995
1749	8,526	7,34	7,22	7,38	7,31	131,1	131,3	131,1	227,2	1,8489
1747	8,961	7,52	7,33	7,42	7,42	131,2	131,5	131,3	227,5	2,0056
1750	8,485	7,37	7,17	7,36	7,30	131,1	131,5	131,3	227,4	1,8486
1748	8,759	7,47	7,31	7,40	7,39	131,1	131,3	131,2	227,2	1,9545
1749	8,925	7,45	7,26	7,40	7,37	131,2	131,5	131,3	227,4	1,9300
1749	8,846	7,47	7,25	7,40	7,38	131,1	131,5	131,1	227,3	1,9590
1749	8,845	7,47	7,24	7,38	7,36	131,2	131,3	131,1	227,2	1,9506
1750	8,999	7,49	7,37	7,40	7,42	131,2	131,4	131,2	227,4	1,9487

Tabela A.15 – Motor alto rendimento de 3 cv com 50% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1748	8,398	7,40	7,23	7,40	7,34	131,2	131,4	131,2	227,4	1,8947
1748	8,944	7,49	7,35	7,39	7,41	131,1	131,2	131,1	227,1	1,9484
1747	8,981	7,48	7,26	7,40	7,38	131,3	131,4	131,2	227,4	1,9480
1773	5,636	6,45	6,35	6,48	6,43	131,3	131,4	131,4	227,6	1,2295
1772	5,633	6,48	6,29	6,47	6,41	131,3	131,7	131,5	227,7	1,2851
1773	5,652	6,47	6,28	6,46	6,41	131,2	131,4	131,4	227,5	1,2810
1774	5,384	6,45	6,26	6,51	6,40	131,4	131,6	131,6	227,8	1,2014
1774	5,670	6,44	6,35	6,49	6,43	131,3	131,8	131,6	227,8	1,2392
1773	5,657	6,46	6,36	6,49	6,43	131,3	131,5	131,4	227,7	1,2353
1772	5,679	6,45	6,27	6,42	6,38	130,9	131,2	131,0	226,9	1,2806

Tabela A.16 – Motor alto rendimento de 3 cv com rotor livre

IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
6,78	6,71	6,88	6,79	138,7	138,9	138,6	240,2	0,2946
6,81	6,76	6,89	6,82	138,8	139,0	138,6	240,3	0,2970
6,80	6,71	6,87	6,79	138,8	138,8	138,5	240,2	0,2974
6,81	6,72	6,88	6,80	138,8	138,8	138,5	240,2	0,2982
6,83	6,74	6,91	6,83	138,8	138,9	138,5	240,3	0,2963
5,35	5,33	5,44	5,38	126,3	127,3	127,4	220,0	0,1954
5,33	5,29	5,42	5,35	126,1	127,1	127,2	219,6	0,1925
5,33	5,29	5,43	5,35	126,1	127,2	127,2	219,7	0,1959
5,33	5,31	5,46	5,37	126,2	127,1	127,2	219,6	0,2011
5,36	5,34	5,47	5,39	126,4	127,4	127,5	220,1	0,1953
5,35	5,34	5,46	5,38	126,4	127,2	127,3	219,9	0,1971
5,34	5,32	5,45	5,37	126,3	127,3	127,4	220,0	0,1946
5,34	5,32	5,45	5,37	126,3	127,3	127,4	220,0	0,1986
5,32	5,29	5,42	5,34	126,1	127,0	127,2	219,6	0,1975

5,35	5,31	5,43	5,37	126,3	127,2	127,3	219,8	0,1953
3,69	3,67	3,70	3,69	103,8	105,4	104,4	180,3	0,1015
3,70	3,67	3,69	3,69	103,9	105,5	104,5	180,5	0,1039
3,69	3,67	3,70	3,69	103,9	105,4	104,4	180,4	0,1061
3,69	3,65	3,69	3,68	103,8	105,3	104,3	180,1	0,1025
3,69	3,66	3,69	3,68	103,7	105,4	104,4	180,2	0,1030
2,62	2,60	2,64	2,62	82,5	83,4	83,1	140,3	0,0626
2,62	2,61	2,63	2,62	82,4	83,3	83,1	140,2	0,0625
2,62	2,60	2,64	2,62	82,5	83,4	83,2	140,3	0,0631
2,63	2,62	2,65	2,63	82,6	83,5	83,3	140,5	0,0645
2,63	2,61	2,64	2,63	82,8	83,7	83,5	140,8	0,0643
1,79	1,78	1,76	1,78	63,2	65,6	61,8	99,8	0,0392
1,79	1,78	1,76	1,77	63,1	65,6	61,8	99,7	0,0390
1,79	1,77	1,76	1,77	63,1	65,5	61,7	99,6	0,0396
1,79	1,78	1,76	1,78	63,1	65,5	61,7	99,6	0,0391
1,79	1,78	1,76	1,78	63,1	65,5	61,7	99,6	0,0397
1,08	1,09	1,08	1,08	49,2	51,0	49,1	60,1	0,0258
1,08	1,09	1,08	1,08	49,2	51,0	49,1	60,1	0,0257
1,09	1,09	1,08	1,09	49,1	51,0	49,1	60,1	0,0258
1,07	1,08	1,08	1,08	49,1	51,0	49,0	60,1	0,0253
1,09	1,09	1,08	1,08	49,1	50,9	49,0	60,1	0,0252
0,78	0,79	0,83	0,80	45,6	46,6	46,3	39,9	0,0209
0,78	0,79	0,82	0,80	45,6	46,6	46,3	40,0	0,0206
0,77	0,79	0,83	0,80	45,6	46,5	46,3	39,9	0,0208
0,78	0,78	0,82	0,80	45,6	46,5	46,2	40,0	0,0209
0,78	0,79	0,82	0,80	45,7	46,7	46,4	40,0	0,0205
0,68	0,70	0,75	0,71	45,1	45,8	45,5	29,9	0,0193
0,68	0,69	0,75	0,71	45,1	45,8	45,6	30,0	0,0195
0,68	0,70	0,75	0,71	45,1	45,9	45,6	29,9	0,0191
0,68	0,69	0,75	0,71	45,2	45,9	45,7	30,0	0,0191
0,68	0,70	0,74	0,71	45,1	45,9	45,7	30,0	0,0190
0,67	0,68	0,74	0,70	45,3	45,9	45,7	25,5	0,0185
0,67	0,67	0,74	0,70	45,2	45,9	45,6	25,5	0,0183
0,66	0,67	0,74	0,69	45,2	45,8	45,6	25,5	0,0184

Motor convencional WEG de 3 cv

Tabela A.17 – Motor convencional de 3 cv com 100% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1715	12,062	8,62	8,80	8,74	8,72	129,9	130,4	130,3	225,5	2,7998
1715	12,047	8,63	8,76	8,75	8,72	130,0	130,6	130,3	225,6	2,8109
1714	12,158	8,58	8,86	8,69	8,71	130,0	130,6	130,5	225,8	2,7726
1715	12,334	8,56	8,70	8,71	8,66	130,1	130,5	130,5	225,8	2,7526
1716	12,141	8,51	8,57	8,70	8,59	130,2	130,6	130,5	225,9	2,7203
1716	12,204	8,52	8,68	8,72	8,64	130,1	130,7	130,4	225,9	2,7647
1715	12,407	8,65	8,87	8,78	8,77	130,1	130,6	130,5	225,9	2,8249
1716	12,517	8,60	8,68	8,78	8,68	130,1	130,6	130,5	225,8	2,7860
1714	12,354	8,65	8,78	8,74	8,72	130,1	130,4	130,3	225,6	2,7812
1715	12,258	8,55	8,79	8,72	8,69	130,0	130,7	130,3	225,8	2,7812
1714	12,172	8,56	8,74	8,68	8,66	130,0	130,4	130,3	225,6	2,7442
1714	12,257	8,55	8,78	8,72	8,68	130,0	130,6	130,3	225,7	2,7763

Tabela A.18 – Motor convencional de 3 cv com 75% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1750	8,290	6,85	6,98	7,01	6,95	129,7	130,1	130,1	225,1	1,8630
1750	8,454	6,86	7,09	7,02	6,99	129,8	130,3	130,1	225,3	1,8990
1750	8,898	6,86	6,95	7,04	6,95	129,7	130,0	129,9	224,9	1,8905
1749	8,474	6,84	6,98	7,00	6,94	129,6	130,0	129,9	224,9	1,8629
1748	8,705	6,95	7,00	7,10	7,02	129,7	129,9	129,9	224,9	1,9466
1748	8,454	6,81	7,06	6,99	6,95	129,5	130,0	129,8	224,8	1,8687
1749	8,647	6,86	6,95	7,01	6,94	129,6	129,9	129,8	224,8	1,8884
1748	8,811	7,00	7,14	7,07	7,07	129,6	129,9	129,9	224,8	1,9903
1749	8,564	6,86	6,98	6,99	6,94	129,6	129,9	129,9	224,8	1,8656
1749	8,735	6,81	7,02	6,99	6,94	129,6	130,2	129,9	225,0	1,8648
1749	8,609	6,89	6,99	7,05	6,98	129,6	130,0	130,0	225,0	1,9049
1749	8,720	6,95	7,17	7,02	7,05	129,9	130,3	130,1	225,3	1,9703

Tabela A.19 – Motor convencional de 3 cv com 50% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1766	6,058	5,87	6,15	6,09	6,04	128,6	129,2	128,9	223,2	1,3191
1766	6,111	5,91	6,04	6,14	6,03	128,5	129,0	128,8	223,0	1,3543
1765	6,092	5,92	6,22	6,09	6,08	128,6	129,1	128,9	223,2	1,3787
1766	6,499	5,92	6,03	6,13	6,03	128,6	129,0	128,8	223,1	1,3681
1765	5,834	5,91	6,12	6,10	6,04	128,4	128,8	128,7	222,8	1,3582
1766	6,586	5,97	5,99	6,10	6,02	128,4	128,8	128,6	222,8	1,3929
1766	6,205	5,94	6,20	6,12	6,09	128,5	129,1	128,9	223,2	1,4201
1767	6,303	5,94	6,09	6,14	6,06	128,6	129,1	128,9	223,2	1,4157
1766	6,350	5,93	6,24	6,06	6,08	128,5	129,1	128,8	223,1	1,4089
1766	6,027	5,98	6,21	6,10	6,10	128,4	128,9	128,7	222,9	1,4602
1766	5,918	5,84	6,04	6,06	5,98	128,5	129,0	128,6	222,9	1,2874

Tabela A.20 – Motor convencional de 3 cv com rotor livre

IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
6,99	6,97	7,09	7,02	144,8	144,0	143,4	249,3	0,4189
7,05	6,98	7,12	7,05	145,0	144,0	143,5	249,5	0,4033
7,09	6,97	7,11	7,06	145,1	144,0	143,5	249,6	0,3981
7,07	6,99	7,15	7,07	145,0	144,1	143,5	249,5	0,4094
7,06	6,96	7,12	7,05	145,0	144,1	143,5	249,6	0,4129
5,04	4,90	4,93	4,95	127,3	126,7	126,8	219,8	0,2494
5,04	4,89	4,92	4,95	127,2	126,6	126,5	219,6	0,2491
5,05	4,87	4,94	4,95	127,3	126,6	126,7	219,8	0,2503
5,07	4,90	4,94	4,97	127,4	126,7	126,8	219,9	0,2391
5,06	4,87	4,91	4,95	127,3	126,6	126,7	219,8	0,2515
5,06	4,90	4,93	4,96	127,3	126,6	126,7	219,8	0,2354
5,04	4,87	4,94	4,95	127,2	126,6	126,7	219,7	0,2450
5,04	4,86	4,96	4,96	127,3	126,6	126,7	219,8	0,2423
5,02	4,88	4,91	4,94	127,2	126,5	126,5	219,5	0,2461
5,02	4,86	4,93	4,94	127,1	126,4	126,6	219,5	0,2420
3,60	3,51	3,54	3,55	104,3	103,7	104,1	179,5	0,1490

3,59	3,5	3,55	3,54	104,2	103,6	104,0	179,3	0,1540
3,59	3,49	3,55	3,54	104,3	103,6	104,1	179,4	0,1522
3,60	3,51	3,54	3,55	104,2	103,6	104,0	179,3	0,1528
3,58	3,49	3,53	3,54	104,3	103,6	104,0	179,3	0,1505
2,74	2,66	2,72	2,70	83,1	81,9	82,9	139,7	0,0956
2,75	2,66	2,71	2,70	83,1	81,9	82,9	139,7	0,0958
2,72	2,65	2,69	2,69	83,1	81,9	82,9	139,7	0,0937
2,73	2,66	2,70	2,70	83,0	81,9	82,8	139,6	0,0955
2,73	2,66	2,70	2,70	83,1	81,9	82,8	139,7	0,0952
1,94	1,96	1,96	1,95	64,3	63,8	61,9	99,4	0,0576
1,93	1,97	1,94	1,95	64,3	63,8	61,8	99,4	0,0561
1,94	1,98	1,95	1,96	64,3	63,7	61,8	99,4	0,0572
1,95	1,99	1,95	1,96	64,2	63,7	61,7	99,3	0,0561
1,94	1,98	1,95	1,95	64,2	63,7	61,8	99,3	0,0567
1,12	1,11	1,18	1,14	48,7	46,2	47,6	50,4	0,0283
1,13	1,10	1,18	1,14	48,7	46,2	47,6	50,4	0,0285
1,11	1,11	1,19	1,14	48,6	46,2	47,5	50,4	0,0286
1,12	1,12	1,19	1,14	48,7	46,2	47,5	50,4	0,0281
1,12	1,12	1,20	1,14	48,7	46,3	47,6	50,4	0,0289
0,95	1,02	1,02	1,00	46,7	45,4	45,5	39,9	0,0244
0,95	1,01	1,01	0,99	46,7	45,5	45,5	40,0	0,0238
0,95	1,03	1,02	1,00	46,7	45,4	45,5	40,0	0,0245
0,94	1,02	1,01	0,99	46,7	45,4	45,5	40,0	0,0240
0,95	1,02	1,02	1,00	46,7	45,4	45,5	40,0	0,0245
0,82	0,90	0,98	0,90	45,8	44,9	45,6	30,7	0,0214
0,82	0,89	0,97	0,89	45,7	44,8	45,5	30,6	0,0210
0,82	0,90	0,97	0,90	45,7	44,9	45,6	30,6	0,0217
0,82	0,90	0,97	0,90	45,7	44,8	45,6	30,6	0,0214
0,83	0,89	0,97	0,90	45,8	44,9	45,7	30,7	0,0217
0,80	0,87	0,95	0,87	45,7	44,9	45,4	25,1	0,0205
0,78	0,88	0,94	0,87	45,7	44,9	45,4	25,1	0,0202
0,79	0,87	0,94	0,86	45,5	44,8	45,3	25,1	0,0198
0,79	0,86	0,95	0,86	45,7	44,8	45,4	25,1	0,0201
0,79	0,86	0,95	0,86	45,7	44,9	45,4	25,1	0,0201

Motor convencional Metal Corte de 5 cv

Tabela A.21 – Motor convencional de 5 cv com 100% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1746	19,980	13,07	14,44	14,5	14,00	127,1	128,2	127,4	221,0	4,4309
1747	20,148	13,04	14,44	14,46	13,98	127,2	128,1	127,4	221,0	4,4251
1746	20,093	13,10	14,49	14,54	14,04	127,1	128,1	127,4	220,9	4,4436
1746	20,062	13,06	14,46	14,47	14,00	127,1	128,1	127,3	220,8	4,4330
1747	20,276	13,05	14,47	14,50	14,01	127,2	128,2	127,4	221,0	4,4320
1746	20,186	13,06	14,48	14,52	14,02	127,0	127,9	127,3	220,7	4,4352
1746	20,215	13,12	14,50	14,55	14,06	127,1	128,4	127,5	221,1	4,4550
1747	20,272	13,11	14,49	14,55	14,05	127,1	128,1	127,3	220,9	4,4520
1746	20,231	13,15	14,51	14,57	14,07	127,1	128,0	127,3	220,8	4,4594
1746	20,339	13,17	14,53	14,56	14,09	127,1	128,1	127,3	220,8	4,4641
1747	20,437	13,13	14,54	14,58	14,09	127,0	128,1	127,4	220,9	4,4619
1746	20,242	13,13	14,51	14,54	14,06	127,1	128,1	127,4	220,9	4,4539

Tabela A.22 – Motor convencional de 5 cv com 75% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1759	14,772	10,32	11,57	11,65	11,18	127,1	128,2	127,3	220,9	3,2883
1760	14,873	10,30	11,52	11,6	11,14	127,2	128,1	127,2	220,8	3,2723
1758	14,794	10,34	11,57	11,62	11,17	127,1	128,2	127,2	220,9	3,2904
1759	14,829	10,33	11,54	11,65	11,17	127,2	128,2	127,3	220,9	3,2834
1761	15,025	10,32	11,54	11,63	11,16	127,2	128,2	127,3	220,9	3,2721
1760	14,924	10,32	11,55	11,65	11,17	127,3	128,4	127,4	221,1	3,2829
1759	14,811	10,34	11,57	11,69	11,20	127,3	128,3	127,4	221,1	3,2999
1761	14,964	10,33	11,58	11,62	11,18	127,3	128,3	127,4	221,1	3,2836
1761	14,845	10,30	11,53	11,64	11,16	127,2	128,2	127,4	221,0	3,2787
1759	14,840	10,33	11,61	11,65	11,20	127,2	128,2	127,4	221,0	3,2993
1761	14,979	10,28	11,55	11,62	11,15	127,1	128,1	127,3	220,8	3,2659
1758	14,814	10,33	11,59	11,67	11,19	127,1	128,0	127,2	220,7	3,2986

Tabela A.23 – Motor convencional de 5 cv com 50% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1773	9,961	8,10	9,24	9,53	8,96	127,3	128,2	127,5	221,1	2,2481
1772	9,786	8,08	9,27	9,55	8,97	127,2	128,3	127,5	221,1	2,2566
1774	9,867	8,08	9,24	9,54	8,95	127,2	128,2	127,5	221,1	2,2339
1774	9,962	8,05	9,17	9,50	8,90	127,2	128,1	127,4	221,0	2,2072
1772	9,775	8,10	9,27	9,56	8,98	127,3	128,3	127,5	221,2	2,2624
1773	9,841	8,08	9,27	9,55	8,97	127,3	128,3	127,5	221,2	2,2479
1772	9,875	8,12	9,30	9,56	8,99	127,3	128,2	127,5	221,2	2,2674
1774	10,101	8,11	9,26	9,50	8,96	127,2	128,2	127,4	221,0	2,2392
1774	9,822	8,06	9,20	9,49	8,92	127,2	128,4	127,4	221,1	2,2202
1774	9,896	8,07	9,22	9,52	8,94	127,3	128,4	127,6	221,3	2,2353
1774	9,881	8,07	9,22	9,52	8,94	127,3	128,1	127,5	221,1	2,2352
1774	9,896	8,06	9,22	9,52	8,93	127,2	128,2	127,5	221,1	2,2313

Tabela A.24 – Motor convencional de 5 cv com rotor livre

IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
10,43	10,76	9,14	10,11	144,4	146,0	143,3	250,1	0,6245
10,42	10,73	9,18	10,11	144,3	146,1	143,0	250,0	0,6122
10,39	10,71	9,16	10,08	144,3	146,2	143,1	250,0	0,6248
10,43	10,72	9,17	10,11	144,4	146,3	143,0	250,1	0,6331
10,41	10,74	9,16	10,10	144,3	146,4	143,1	250,2	0,6141
6,92	7,21	6,02	6,72	126,4	128,3	127,2	220,5	0,3711
6,91	7,19	6,01	6,70	126,4	128,1	127,1	220,3	0,3709
6,94	7,20	6,01	6,72	126,5	128,2	127,2	220,4	0,3677
6,94	7,22	6,03	6,73	126,5	128,1	127,2	220,4	0,3704
6,95	7,24	6,00	6,73	126,6	128,4	127,3	220,7	0,3660
6,93	7,23	6,00	6,72	126,6	128,3	127,3	220,7	0,3727
6,95	7,19	6,04	6,72	126,5	128,3	127,2	220,5	0,3627
6,96	7,19	6,05	6,73	126,6	128,3	127,3	220,7	0,3582
6,94	7,18	6,03	6,72	126,6	128,0	127,2	220,4	0,3621

6,99	7,21	6,05	6,75	126,6	128,3	127,3	220,7	0,3483
4,74	4,83	4,13	4,57	103,4	106,0	105,2	181,1	0,1974
4,76	4,84	4,12	4,57	103,5	105,9	105,2	181,1	0,2000
4,76	4,85	4,12	4,58	103,6	106,2	105,3	181,4	0,1949
4,75	4,85	4,12	4,58	103,7	106,2	105,4	181,5	0,1996
3,35	3,36	2,98	3,23	81,3	82,9	82,1	139,2	0,1182
3,35	3,36	3,00	3,24	81,3	82,8	82,1	139,2	0,1199
3,35	3,38	2,98	3,24	81,2	82,9	82,1	139,2	0,1171
3,35	3,38	2,98	3,24	81,2	82,9	82,0	139,1	0,1173
2,40	2,39	2,13	2,30	62,3	65,7	61,4	100,7	0,0783
2,39	2,38	2,11	2,29	62,3	65,6	61,4	100,7	0,0772
2,40	2,39	2,13	2,30	62,3	65,6	61,4	100,7	0,0776
2,40	2,39	2,13	2,31	62,3	65,7	61,4	100,7	0,0779
1,96	1,93	1,70	1,86	54,2	57,7	51,8	80,6	0,0619
1,97	1,94	1,70	1,87	54,3	57,7	51,9	80,7	0,0622
1,96	1,94	1,71	1,87	54,3	57,8	52,0	80,8	0,0618
1,96	1,93	1,70	1,86	54,3	57,8	52,0	80,8	0,0619
1,66	1,63	1,44	1,58	49,6	52,3	48,6	66,6	0,0534
1,55	1,51	1,34	1,47	47,5	49,9	47,0	60,2	0,0497
1,55	1,51	1,34	1,47	47,5	49,9	47,0	60,2	0,0496
1,55	1,51	1,34	1,47	47,6	49,9	47,0	60,2	0,0499
1,55	1,51	1,35	1,47	47,5	49,9	47,0	60,2	0,0493
1,20	1,17	1,12	1,16	43,1	44,5	43,9	39,5	0,0416
1,20	1,17	1,11	1,16	43,0	44,4	43,8	39,5	0,0410
1,20	1,16	1,12	1,16	43,0	44,4	43,7	39,4	0,0412
1,20	1,16	1,13	1,16	43,0	44,4	43,7	39,4	0,0412
1,16	1,14	1,12	1,14	42,8	43,9	43,5	35,2	0,0398
1,15	1,13	1,09	1,13	42,8	44,0	43,5	35,2	0,0397
1,16	1,14	1,10	1,13	42,8	43,9	43,5	35,2	0,0396
1,16	1,14	1,09	1,13	42,9	44,0	43,6	35,2	0,0399
1,15	1,12	1,09	1,12	42,6	43,7	43,1	32,9	0,0392
1,18	1,12	1,09	1,13	42,3	43,3	42,6	29,7	0,0381
1,17	1,11	1,07	1,12	42,3	43,3	42,6	29,8	0,0371
1,18	1,11	1,11	1,13	42,2	43,2	42,5	29,7	0,0383

Motor alto rendimento Metal Corte de 5 cv

Tabela A.25 – Motor alto rendimento de 5 cv com 100% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1738	20,187	14,32	14,19	14,3	14,27	127,6	127,8	127,5	221,1	4,2612
1738	20,257	14,24	14,13	14,25	14,21	127,5	127,6	127,5	220,9	4,2323
1736	20,228	14,25	14,12	14,22	14,20	127,5	127,4	127,4	220,7	4,2295
1736	20,314	14,30	14,14	14,30	14,25	127,5	127,7	127,4	220,9	4,2528
1736	20,199	14,29	14,16	14,30	14,25	127,5	127,8	127,5	221,0	4,2430
1735	20,113	14,29	14,18	14,31	14,26	127,5	127,5	127,5	220,8	4,2563
1736	20,264	14,28	14,16	14,32	14,25	127,6	127,9	127,5	221,1	4,2540
1736	20,324	14,30	14,12	14,33	14,25	127,6	127,7	127,5	221,0	4,2485
1735	20,230	14,24	14,13	14,29	14,22	127,5	127,5	127,4	220,7	4,2345
1735	20,116	14,30	14,21	14,29	14,27	127,5	127,6	127,5	220,9	4,2491
1736	20,273	14,30	14,18	14,31	14,26	127,4	127,6	127,5	220,9	4,2522
1735	20,255	14,29	14,16	14,30	14,25	127,5	127,5	127,4	220,8	4,2474

Tabela A.26 – Motor alto rendimento de 5 cv com 75% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1756	15,201	11,61	11,50	11,70	11,61	126,8	126,7	126,7	219,5	3,1883
1758	15,354	11,60	11,51	11,72	11,61	126,7	126,9	126,9	219,7	3,1878
1756	15,076	11,58	11,55	11,68	11,60	126,7	126,9	126,8	219,6	3,1763
1757	14,788	11,49	11,46	11,58	11,51	126,8	126,9	126,8	219,7	3,1427
1757	14,863	11,49	11,41	11,56	11,48	126,8	126,9	126,9	219,7	3,1242
1757	14,779	11,47	11,40	11,57	11,48	126,8	126,9	126,8	219,7	3,1217
1757	14,803	11,51	11,41	11,57	11,50	126,7	126,9	126,7	219,6	3,1281
1756	15,084	11,56	11,48	11,65	11,56	126,7	126,8	126,7	219,5	3,1628
1756	15,040	11,54	11,43	11,63	11,53	126,7	126,9	126,8	219,6	3,1574
1756	15,164	11,59	11,48	11,66	11,57	126,7	126,8	126,8	219,6	3,1621
1756	14,958	11,58	11,47	11,67	11,57	126,6	126,7	126,7	219,4	3,1505
1757	15,150	11,59	11,51	11,68	11,59	126,7	127,0	126,7	219,6	3,1740

Tabela A.27 – Motor alto rendimento de 5 cv com 50% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1773,00	10,411	9,57	9,44	9,58	9,53	126,9	126,9	126,8	219,7	2,2201
1772,00	10,147	9,56	9,46	9,64	9,55	126,8	126,9	126,8	219,7	2,2308
1772,00	10,257	9,60	9,49	9,64	9,58	126,9	126,7	126,6	219,5	2,2528
1772,00	10,297	9,56	9,48	9,63	9,56	126,9	126,9	126,8	219,7	2,2436
1772,00	10,292	9,57	9,50	9,59	9,55	127,0	126,9	126,8	219,8	2,2382
1772,00	10,215	9,57	9,48	9,61	9,56	127,0	127,0	126,9	219,9	2,2206
1772,00	10,333	9,57	9,46	9,56	9,53	127,0	127,0	126,9	219,9	2,2170
1774,00	10,301	9,58	9,45	9,63	9,56	126,8	126,6	126,7	219,5	2,2343
1773,00	10,465	9,58	9,49	9,57	9,55	126,9	127,1	126,8	219,8	2,2155
1773,00	9,607	9,20	9,11	9,24	9,19	125,8	125,7	125,7	217,8	2,0995
1774,00	9,669	9,32	9,21	9,33	9,29	126,8	126,8	126,5	219,4	2,1090
1774,00	9,724	9,39	9,28	9,38	9,35	126,7	126,6	126,5	219,3	2,1269
1774,00	9,531	9,36	9,27	9,38	9,34	126,6	126,4	126,5	219,1	2,1072
1774,00	9,752	9,35	9,25	9,37	9,33	126,8	126,7	126,6	219,4	2,1113

Tabela A.28 – Motor alto rendimento de 5 cv com rotor livre

IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
9,20	9,37	9,56	9,37	138,0	139,4	137,8	239,6	0,3347
9,33	9,61	9,71	9,55	137,9	139,3	137,6	239,3	0,3318
9,36	9,61	9,75	9,57	138,0	139,4	137,6	239,5	0,3362
9,15	9,41	9,56	9,37	137,9	139,1	137,5	239,2	0,3259
9,25	9,46	9,62	9,44	137,8	138,9	137,4	238,9	0,3304
7,18	7,46	7,58	7,41	126,0	126,6	127,2	219,3	0,2313
7,24	7,36	7,57	7,39	126,2	126,3	127,1	219,2	0,2323
7,18	7,46	7,54	7,40	126,2	126,7	127,3	219,5	0,2331
7,13	7,40	7,51	7,35	126,1	126,7	127,3	219,4	0,2311
7,20	7,53	7,60	7,44	126,1	126,7	127,2	219,4	0,2349
7,24	7,52	7,61	7,46	126,1	126,9	127,3	219,6	0,2302
7,10	7,49	7,51	7,37	126,1	127,1	127,4	219,7	0,2267
7,25	7,50	7,56	7,44	126,1	126,7	127,1	219,3	0,2374

7,22	7,49	7,54	7,42	126,0	126,7	127,1	219,3	0,2261
7,27	7,56	7,62	7,48	126,3	126,8	127,3	219,6	0,2256
7,23	7,61	7,64	7,49	126,2	127,0	127,3	219,6	0,2331
4,43	4,62	4,59	4,54	96,4	100,4	98,9	169,9	0,1256
4,45	4,63	4,61	4,56	96,6	100,4	99,0	170,0	0,1264
4,45	4,65	4,63	4,58	96,5	100,5	98,9	169,9	0,1279
4,44	4,63	4,61	4,56	96,7	100,7	99,1	170,3	0,1235
4,45	4,65	4,62	4,57	96,7	100,8	99,2	170,4	0,1262
3,15	3,17	3,25	3,19	76,7	77,7	77,6	130,2	0,0856
3,10	3,16	3,21	3,15	76,7	77,7	77,5	130,2	0,0829
3,14	3,19	3,24	3,19	76,7	77,8	77,6	130,3	0,0837
3,10	3,15	3,21	3,15	76,7	77,7	77,6	130,3	0,0865
3,15	3,18	3,24	3,19	76,6	77,5	77,5	130,1	0,0852
2,35	2,36	2,32	2,34	63,4	65,1	60,0	100,7	0,0641
2,35	2,34	2,32	2,34	63,4	65,0	59,9	100,6	0,0643
2,36	2,35	2,33	2,35	63,4	65,0	59,9	100,6	0,0634
2,36	2,35	2,32	2,35	63,4	65,0	60,0	100,7	0,0629
2,36	2,37	2,34	2,35	63,4	65,0	60,0	100,7	0,0651
1,61	1,62	1,62	1,62	50,3	52,2	48,8	70,3	0,0478
1,61	1,62	1,62	1,62	50,2	52,2	48,8	70,3	0,0473
1,61	1,62	1,62	1,62	50,3	52,3	48,8	70,4	0,0465
1,61	1,63	1,62	1,62	50,3	52,2	48,9	70,4	0,0476
1,61	1,62	1,63	1,62	50,3	52,2	48,9	70,3	0,0481
1,22	1,24	1,24	1,23	44,4	46,2	43,9	50,5	0,0401
1,23	1,24	1,24	1,23	44,5	46,2	43,9	50,5	0,0403
1,23	1,24	1,23	1,23	44,5	46,3	43,9	50,5	0,0402
1,22	1,23	1,23	1,23	44,5	46,2	43,9	50,4	0,0401
1,23	1,23	1,25	1,24	44,5	46,3	44,0	50,5	0,0403
1,02	1,04	1,07	1,04	41,2	42,3	41,7	30,7	0,0349
1,02	1,05	1,07	1,05	41,3	42,5	41,8	30,8	0,0348
1,03	1,05	1,08	1,05	41,1	42,3	41,7	30,7	0,0355
1,03	1,04	1,08	1,05	41,0	42,3	41,6	30,7	0,0353

Motor Eberle 7,5 cv

Tabela A.29 – Motor Eberle de 7,5 cv com 100% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1724	30,836	20,91	20,93	20,75	20,86	127,2	127,7	127,3	220,6	6,5911
1723	30,915	20,88	20,97	20,71	20,85	127,5	128,7	127,5	221,5	6,6092
1723	30,928	20,89	20,95	20,71	20,85	127,4	128,1	127,5	221,1	6,5900
1722	30,817	21,03	21,09	20,82	20,98	127,1	127,7	127,3	220,6	6,6430
1722	30,922	21,04	21,13	20,87	21,01	127,3	128,0	127,3	221,0	6,6632
1721	30,887	20,90	20,99	20,70	20,86	127,3	128,0	127,2	220,8	6,5989
1721	30,724	20,90	21,00	20,72	20,87	127,2	127,8	127,2	220,7	6,5904
1722	30,850	20,97	21,10	20,77	20,94	127,5	128,2	127,4	221,2	6,6527
1721	30,925	20,97	21,07	20,78	20,94	127,4	128,1	127,4	221,1	6,6367
1723	30,508	20,78	20,87	20,61	20,75	127,3	128,1	127,3	221,0	6,5632
1722	30,517	20,81	20,93	20,64	20,79	127,1	127,6	127,1	220,4	6,5628
1722	30,588	20,79	20,94	20,66	20,80	127,1	127,9	127,2	220,7	6,5723

Tabela A.30 – Motor Eberle de 7,5 cv com 75% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1749	22,239	16,72	16,72	16,51	16,65	126,9	127,5	126,8	220,0	4,7781
1749	22,338	16,77	16,70	16,52	16,66	127,1	127,5	126,9	220,3	4,7755
1750	22,604	16,74	16,72	16,49	16,65	127,1	127,7	127,0	220,4	4,7903
1750	22,453	16,76	16,79	16,53	16,69	126,9	127,6	127,1	220,3	4,8058
1749	22,447	16,74	16,79	16,57	16,70	126,9	127,3	126,9	220,0	4,8008
1749	22,735	16,80	16,81	16,57	16,73	127,2	127,7	127,0	220,5	4,8283
1749	22,365	16,73	16,80	16,61	16,71	127,2	127,5	127,2	220,5	4,7929
1751	22,418	16,66	16,73	16,48	16,62	127,2	128,0	127,2	220,8	4,7680
1749	22,328	16,66	16,69	16,48	16,61	127,2	127,8	127,1	220,6	4,7698
1749	22,373	16,71	16,72	16,54	16,66	127,3	127,9	127,2	220,8	4,7938
1749	22,656	16,78	16,82	16,59	16,73	127,1	127,6	127,1	220,4	4,8205
1749	22,496	16,72	16,76	16,56	16,68	127,1	127,7	127,0	220,4	4,8061

Tabela A.31 – Motor Eberle de 7,5 cv com 50% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1773	14,461	13,39	13,78	13,50	13,56	127,8	128,5	128,0	221,9	3,1487
1770	14,015	13,42	13,72	13,51	13,55	127,8	128,5	128,0	221,9	3,2044
1771	14,656	13,46	13,87	13,51	13,62	127,8	128,8	128,1	222,1	3,2364
1773	14,606	13,44	13,83	13,48	13,58	127,9	128,6	128,0	222,0	3,1606
1772	14,160	13,40	13,81	13,49	13,57	127,9	128,8	128,1	222,2	3,1422
1770	14,347	13,50	13,80	13,50	13,60	127,9	128,6	128,1	222,1	3,2208
1772	14,344	13,42	13,89	13,47	13,59	127,9	128,7	128,0	222,1	3,1892
1772	14,529	13,41	13,76	13,46	13,54	127,9	128,9	128,0	222,2	3,1334
1771	14,344	13,44	13,79	13,46	13,56	127,9	128,5	127,9	221,9	3,1516
1770	14,105	13,43	13,76	13,51	13,56	127,7	128,6	127,8	221,8	3,2105
1770	14,592	13,41	13,86	13,46	13,58	127,7	128,4	127,8	221,7	3,2200
1772	14,608	13,43	13,80	13,44	13,56	127,7	128,7	127,9	221,9	3,1512

Tabela A.32 – Motor Eberle de 7,5 cv com rotor livre

IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
10,98	11,00	11,10	11,03	126,5	127,2	126,8	219,7	0,5199
10,95	11,03	11,14	11,04	126,5	127,4	126,9	219,8	0,5201
11,05	11,09	11,13	11,09	126,8	127,7	127,0	220,2	0,5195
11,03	11,11	11,12	11,08	126,9	127,8	127,1	220,4	0,5251
11,03	11,11	11,10	11,08	126,8	127,6	127,1	220,3	0,5135
11,05	11,09	11,10	11,08	126,8	127,7	127,0	220,3	0,5126
11,05	11,07	11,13	11,08	126,6	127,3	126,9	219,9	0,5161
11,07	11,12	11,10	11,10	126,8	127,5	127,0	220,1	0,5183
11,05	11,07	11,09	11,07	126,7	127,4	126,9	220,0	0,5171
11,02	11,06	11,07	11,05	126,7	127,5	126,8	220,0	0,5151
11,03	11,05	11,09	11,06	126,8	127,3	126,9	219,9	0,5154
11,02	11,07	11,10	11,06	126,7	127,6	126,9	220,1	0,5181
11,02	11,08	11,06	11,06	126,7	127,5	126,9	220,0	0,5188
7,99	8,28	8,17	8,15	101,3	106,6	105,3	180,2	0,3305
7,99	8,29	8,17	8,15	101,5	107,0	105,1	180,4	0,3347

8,03	8,29	8,15	8,16	101,6	106,5	104,8	180,1	0,3310
8,08	8,30	8,09	8,16	102,2	105,9	104,4	179,9	0,3272
8,13	8,28	8,07	8,16	102,5	105,8	104,3	180,0	0,3312
6,15	6,11	6,14	6,14	81,5	82,3	83,9	140,2	0,2086
6,18	6,15	6,15	6,16	81,4	82,3	84,0	140,2	0,2078
6,20	6,16	6,17	6,18	81,4	82,2	84,0	140,2	0,2084
6,22	6,16	6,17	6,18	81,5	82,2	84,2	140,3	0,2080
6,22	6,17	6,16	6,18	81,5	82,2	84,2	140,3	0,2103
3,75	3,71	3,27	3,58	54,8	59,6	48,3	79,0	0,0926
3,74	3,70	3,26	3,57	54,7	59,9	48,3	79,1	0,0919
3,73	3,70	3,26	3,56	54,7	59,9	48,4	79,2	0,0917
3,74	3,70	3,25	3,56	54,8	59,9	48,5	79,2	0,0911
3,75	3,71	3,26	3,57	54,8	60,0	48,5	79,3	0,0918
2,86	2,84	2,66	2,79	46,7	50,2	46,5	60,1	0,0672
2,80	2,86	2,72	2,79	45,6	50,3	47,7	60,0	0,0670
2,80	2,86	2,72	2,80	45,7	50,3	47,7	60,0	0,0676
2,78	2,85	2,73	2,79	45,7	50,3	47,7	60,0	0,0671
2,79	2,85	2,74	2,79	45,7	50,3	47,7	60,0	0,0666
2,11	2,05	1,93	2,03	43,0	44,9	43,7	40,2	0,0478
2,12	2,05	1,92	2,03	43,0	45,0	43,6	40,2	0,0482
2,12	2,04	1,91	2,02	42,8	44,8	43,6	40,1	0,0481
2,13	2,05	1,91	2,03	42,8	44,8	43,4	40,1	0,0481
2,13	2,04	1,90	2,02	42,5	44,5	43,2	39,9	0,0478
1,89	1,75	1,47	1,70	42,6	43,9	42,0	30,4	0,0407
1,90	1,76	1,46	1,71	42,5	43,8	42,0	30,4	0,0404
1,92	1,76	1,45	1,71	42,6	43,9	42,0	30,4	0,0409
1,92	1,76	1,45	1,71	42,6	44,0	42,0	30,4	0,0403
1,90	1,76	1,47	1,71	42,6	43,9	42,0	30,4	0,0405
1,69	1,43	1,36	1,49	42,9	42,8	42,6	20,4	0,0342
1,71	1,42	1,35	1,49	42,9	42,8	42,6	20,4	0,0346
1,69	1,42	1,36	1,49	42,8	42,7	42,5	20,4	0,0346
1,70	1,42	1,35	1,49	42,9	42,7	42,6	20,4	0,0340
1,72	1,42	1,34	1,49	42,9	42,7	42,5	20,4	0,0346

Motor WEG de 7,5 cv

Tabela A.33 – Motor WEG de 7,5 cv com 100% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1734	30,398	20,23	20,07	20,64	20,31	125,6	126,0	125,7	217,8	6,5176
1736	30,452	20,33	20,21	20,64	20,39	125,7	126,2	125,8	218,0	6,5508
1735	30,146	20,12	20,00	20,49	20,21	125,8	126,3	126,0	218,3	6,4895
1736	30,224	20,15	20,00	20,46	20,20	125,8	126,3	125,9	218,2	6,4863
1735	30,284	20,16	20,06	20,5	20,24	125,7	126,2	125,7	218,0	6,4972
1735	30,319	20,19	20,07	20,52	20,26	125,7	126,2	125,8	218,1	6,5026
1734	30,400	20,24	20,15	20,59	20,32	125,7	126,2	125,8	218,1	6,5308
1734	29,999	20,02	19,86	20,33	20,07	126,0	126,4	126,0	218,5	6,4398
1733	30,784	20,43	20,26	20,78	20,49	125,9	126,3	126,0	218,3	6,5948
1734	30,372	20,28	20,00	20,54	20,27	126,1	126,4	126,1	218,6	6,5239
1733	30,428	20,27	20,02	20,47	20,26	126,0	126,3	125,9	218,4	6,5077
1734	30,534	20,33	20,07	20,58	20,33	126,1	126,3	126,1	218,5	6,5407

Tabela A.34 – Motor WEG de 7,5 cv com 75% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1755	22,583	15,86	15,75	16,23	15,95	126,2	126,8	126,4	219,1	4,8239
1754	22,545	15,83	15,71	16,20	15,92	126,2	126,9	126,3	219,1	4,8025
1755	22,554	15,89	15,73	16,26	15,96	126,3	126,9	126,4	219,2	4,8231
1756	22,674	15,83	15,71	16,26	15,93	126,3	126,8	126,4	219,1	4,8077
1754	22,539	15,87	15,71	16,25	15,94	126,2	126,7	126,3	219,0	4,8129
1754	22,577	15,86	15,70	16,28	15,95	126,1	126,7	126,3	218,9	4,8162
1754	22,650	15,89	15,71	16,29	15,96	126,3	126,8	126,4	219,1	4,8235
1754	22,671	15,92	15,70	16,34	15,99	126,3	126,8	126,4	219,1	4,8374
1754	22,574	15,87	15,70	16,38	15,98	126,1	126,6	126,3	218,9	4,8329
1756	22,658	15,88	15,70	16,33	15,97	126,2	126,7	126,3	218,9	4,8259
1756	22,668	15,91	15,72	16,35	15,99	126,2	126,7	126,3	219,0	4,8343
1754	22,656	15,93	15,74	16,35	16,01	126,2	126,6	126,3	218,9	4,8462

Tabela A.35 – Motor WEG de 7,5 cv com 50% carregamento

Veloc (rpm)	Torque (Nm)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
1774,00	14,973	12,52	12,46	12,70	12,56	127,8	128,3	127,8	221,6	3,2358
1774,00	14,822	12,54	12,45	12,73	12,57	127,8	128,3	127,8	221,7	3,2423
1774,00	14,945	12,54	12,44	12,71	12,56	127,6	128,2	127,7	221,4	3,2432
1772,00	14,886	12,48	12,43	12,69	12,53	127,6	128,1	127,7	221,3	3,2255
1774,00	14,854	12,48	12,45	12,70	12,54	127,6	128,1	127,5	221,2	3,2255
1773,00	14,941	12,47	12,42	12,67	12,52	127,6	128,1	127,5	221,2	3,2136
1775,00	14,739	12,43	12,38	12,60	12,47	127,5	128,2	127,6	221,3	3,2040
1775,00	14,718	12,43	12,37	12,59	12,46	127,6	128,2	127,7	221,4	3,1938
1774,00	14,708	12,44	12,37	12,61	12,47	127,6	128,2	127,6	221,4	3,1967
1774,00	14,657	12,44	12,36	12,63	12,48	127,7	128,2	127,8	221,5	3,1934
1775,00	14,642	12,42	12,37	12,62	12,47	127,6	128,2	127,7	221,5	3,1870
1775,00	14,620	12,43	12,37	12,61	12,47	127,8	128,3	127,9	221,7	3,1890

Tabela A.36 – Motor WEG de 7,5 cv com rotor livre

IA (A)	IB (A)	IC (A)	Imed (A)	UAn (V)	UBn (V)	UCn (V)	Umed ff (V)	Pot elet (kW)
9,84	10,00	10,02	9,95	129,7	131,0	129,8	225,4	0,4257
9,85	10,00	10,04	9,96	129,7	131,0	129,9	225,5	0,4211
9,82	10,06	10,04	9,97	129,7	131,2	130,0	225,7	0,4204
9,83	10,06	10,06	9,98	129,8	131,2	130,1	225,7	0,4281
9,81	10,04	10,05	9,97	129,7	131,1	130,0	225,6	0,4255
9,83	10,05	10,07	9,98	129,8	131,3	130,1	225,9	0,4313
9,40	9,69	9,60	9,56	127,4	128,8	128,0	221,8	0,3978
9,23	9,51	9,35	9,37	126,2	127,5	126,9	219,8	0,3952
9,19	9,49	9,33	9,34	126,1	127,6	126,8	219,7	0,3919
9,18	9,51	9,33	9,34	126,0	127,6	126,8	219,6	0,3907
9,23	9,50	9,31	9,35	126,1	127,4	126,8	219,5	0,3809
9,21	9,54	9,29	9,35	126,1	127,5	126,8	219,6	0,3950
9,24	9,50	9,30	9,35	126,1	127,6	126,9	219,7	0,3893
9,24	9,49	9,31	9,35	126,1	127,4	126,9	219,6	0,3859
9,20	9,46	9,32	9,33	126,1	127,6	127,0	219,8	0,3847

9,20	9,49	9,32	9,33	126,1	128,0	127,0	220,0	0,3880
9,22	9,50	9,28	9,33	126,1	127,8	127,0	219,9	0,3932
9,23	9,48	9,30	9,34	126,1	127,6	126,9	219,8	0,3949
9,24	9,48	9,36	9,36	126,1	127,7	127,1	219,9	0,3880
7,67	7,97	7,71	7,78	114,0	117,3	115,2	199,9	0,3107
7,68	7,95	7,73	7,78	114,1	117,1	115,2	199,9	0,3120
7,70	7,91	7,69	7,77	114,1	116,9	115,1	199,7	0,3142
7,71	7,93	7,68	7,77	114,2	116,7	115,1	199,6	0,3066
5,84	5,95	5,75	5,85	92,5	94,7	93,1	160,4	0,2017
5,85	5,92	5,77	5,85	92,5	94,7	93,1	160,5	0,1987
5,85	5,94	5,76	5,85	92,5	94,8	93,2	160,6	0,2019
5,84	5,93	5,75	5,84	92,4	94,8	93,1	160,5	0,2026
4,32	4,36	4,18	4,29	71,4	75,5	69,3	119,5	0,1296
4,32	4,36	4,17	4,28	71,5	75,5	69,4	119,6	0,1296
4,32	4,37	4,15	4,28	71,6	75,7	69,5	119,7	0,1279
4,31	4,36	4,17	4,28	71,6	75,6	69,5	119,8	0,1267
4,33	4,36	4,18	4,29	71,6	75,7	69,5	119,8	0,1302
2,94	2,97	2,79	2,90	53,2	57,8	52,2	79,2	0,0836
2,95	2,98	2,80	2,91	53,1	57,9	52,2	79,3	0,0840
2,93	2,97	2,80	2,90	53,2	57,8	52,2	79,3	0,0837
2,95	2,98	2,80	2,91	53,2	57,8	52,2	79,2	0,0840
2,27	2,33	2,23	2,28	46,2	50,3	47,5	59,3	0,0691
2,27	2,32	2,24	2,28	46,1	50,3	47,5	59,3	0,0693
2,27	2,33	2,24	2,28	46,2	50,2	47,6	59,3	0,0684
2,27	2,33	2,24	2,28	46,1	50,2	47,5	59,3	0,0681
1,75	1,81	1,71	1,76	42,9	45,5	43,6	39,5	0,0560
1,76	1,81	1,71	1,76	42,8	45,5	43,5	39,5	0,0560
1,75	1,81	1,70	1,75	42,9	45,5	43,6	39,5	0,0552
1,75	1,80	1,70	1,75	42,8	45,4	43,5	39,4	0,0555
1,79	1,68	1,49	1,65	43,2	44,3	42,5	30,3	0,0524
1,78	1,68	1,49	1,65	43,1	44,1	42,2	30,3	0,0529
1,79	1,67	1,48	1,65	43,2	44,2	42,3	30,4	0,0523
1,80	1,67	1,48	1,65	43,0	44,1	42,2	30,4	0,0522